连续反馈影响主导感的心理与脑电机制

谢晓玲[1] 潘文谊[1] 张纯纯[1] 林静远[1] 李红[1,2]

（[1]四川师范大学脑与心理科学研究院，成都，610066）

（[2]华南师范大学心理学院，广州，510631）

摘要 通过简单赌博任务和主导感的外显测量，操纵连续反馈次数（1~8 次），首次考察了主导感在连续反馈下的变化模式及其脑电机制。结果发现：主导感在连续反馈的作用下随着连续反馈的累积而持续变化，且累积结果在效价间的变化趋势不同。收益条件下，主导感变化趋势符合二次多项式，先上升后趋于稳定；损失条件下，主导感变化趋势符合一元线性模型，随连续损失反馈而降低。脑电上，与不连续损失相比，连续损失期间会诱发更负的右侧 SPN 波幅；而 FRN 波幅对收益的连续性敏感，与不连续收益相比，连续收益下 FRN 波幅更负，且与随后更高的行为选择重复率有关；与连续收益相比，连续损失会诱发更大的 Fb-P3 波幅。综上，收益和损失下主导感的变化模式在行为和脑电层面均呈现差异化。研究为主导感的“动态假说”提供了来自连续反馈下心理及其脑电特征的证据。

关键词 主导感，连续反馈，事件相关电位，SPN，FRN，Fb-P3

分类号 B842.1

1 引言

主导感 (sense of agency, SoA; self-agency, SA) 又称主动控制感 (吴迪 等, 2019; 张淼 等, 2018; 赵科 等, 2021; 黄昕杰 等, 2023; 钟毅平 等, 2023)、施动感 (安灿翎 等, 2021; 田昊月 等, 2018)、自主感 (张静, 李恒威, 2016)，指的是个体作为行为的主导者，控制自己的动作，以此影响外部世界的主观体验 (Haggard, 2017)。比如，我们按下电灯开关，看到灯亮起，便会感到是自己控制了房间的明暗。换言之，主导感产生于个体与外界的互动过程。当个体状态或外在环境不同，主导感——作为主观体验而非既定的能力或特质——自然也会发生变化。更重要的是，研究发现主导感的发展变化是动态的可塑过程 (Martin et al., 2003; Abele et al., 2008; Coyle et al., 2012; Esser et al., 2016; 张静，李恒威, 2016; Damen, 2019; Saarikallio et al., 2020; Nunes et al., 2023)。这些发现通过改变条件、操纵情境或外部反馈来

收稿日期：2024-04-09

教育部哲学社会科学研究重大攻关项目（21JZD063）；国家自然科学基金项目（32400923；32271142）；四川省自然科学基金青年项目（2024NSFSC1226）

谢晓玲、潘文谊、张纯纯为共同第一作者。

通信作者：林静远，E-mail：linjingyuan921@126.com；李红，E-mail：lihong_psych@m.scnu.edu.cn

改变（增强/减弱）主导感，探究其可塑性（plasticity/malleablity） (Braun et al., 2018; Damen, 2019; Alsaleh et al., 2023)，但以往研究只阐明了主导感是可以被改变、具有可塑性，却未探究主导感的变化模式。拥有高水平主导感的个体普遍被认为有较高的自主性和效能感，可以更好地应对生活中出现的逆境 (Frazier et al., 2011)，拥有更好的心理健康状况 (Bryson et al., 2007)；而主导感的缺乏则会导致诸如焦虑、抑郁、退缩等一系列的心理和行为问题 (Burger & Arkin, 1980)。研究发现，增强主导感可能有助于改善抑郁症状 (Scott et al., 2022; Alsaleh et al., 2023; Lin et al., 2024)。因此，理解主导感的变化模式特征与神经机制将为临床心理干预提供理论指导。

主导感产生机制最经典的解释模型是由 Frith 等人 (2000) 提出的“比较器模型”（comparator model）。该模型认为主导感产生于个体对动作结果的预期与对该动作实际结果感受的匹配性 (Blakemore et al., 2002)，只有当行动的预测结果和实际的感官结果相匹配时，才会产生主导感 (Synofzik et al., 2010)。比较器模型假定比较结果是非此即彼的状态，只有实际状态与预测状态完全一致时，主导感才会产生。然而，一方面存在预测与实际结果完全匹配却没有产生强烈主导感的情境，如环境因素：踢球射门（个体动作）后，经过旁人助攻（环境因素）才进球（预测结果）。当其他因素（而非个体动作）导致预期的动作结果时，个体主导感不同于自身动作导致预期结果时的主导感，此时比较器模型难以作出解释。另一方面，研究发现即使预期状态与实际状态并不完全匹配，也可以产生主导感 (Synofzik et al., 2008; Shimada et al., 2009)。Lukitsch (2020) 提出主导感的“动态假说”，认为经典的比较器模型主要基于“静态”视角，即某个时间点所处的状态，只强调全或无的“静态”匹配方式，忽略了主导感在时间进程上发生“动态”变化模式，无法全面刻画主导感的产生机制。因此，本研究基于该作者的“动态假说”探究主导感在时间进程上的变化模式，即探究主导感的动态可塑性。

反馈是关于先前的决定、行动或行为的准确性、充分性或正确性的信息，它可以帮助个人调整其行为以达到预期的目标或状态 (Ilgen et al., 1979)。大量研究相对一致地发现积极结果反馈会增强主导感，消极结果反馈可能使主导感降低 (Yoshie & Haggard, 2013; Barlas & Obhi, 2014; Barlas et al., 2017; Kulakova et al., 2017; Herman & Tsakiris, 2020; Kaiser et al., 2021; Reis et al., 2022)。然而，这些研究大多只关注单次动作和单次结果反馈的关联，未关注先前的结果反馈或连续多次的结果反馈是否对主导感产生影响，以及当反馈效价出现反转后主导感的即时变化。将单次反馈和连续反馈对主导感的影响视为是等同的，缺乏生态效度。在实际生活中，目标追求通常是渐进发展的过程，结果反馈也在连续且累积出现，连续反馈

可以提供更即时和频繁的信息，从而影响个体的行为和感知。因此，本研究关注连续多次的相同效价反馈，探究主导感的动态变化模式。

已有研究发现连续反馈会对个体的情绪体验、行为预期、认知评估等方面造成影响。例如，连续的正面反馈能够增强个体的积极情绪体验，而连续的负面反馈则导致消极情绪的累积 (Ming et al., 2021)。与单赢和单输相比，连续赢和连续输激发更强烈的情绪 (Ma et al., 2018)。也有研究发现连续的反馈顺序，如“先扬后抑”与“先抑后扬”的连续反馈顺序对决策信心有不同的影响 (蔡曙光 等, 2016)，这表明连续反馈不仅影响即时的行为调整，还可能影响个体对未来行为的预期和信心，从而可能影响主导感水平。此外，连续反馈还可能影响个体对自身能力的认知评估，进而影响其自我效能感和动机 (Liden et al., 1988)。根据参照点适应模型，在连续风险决策中，个体会根据先前的结果反馈调整自己的参照点，例如，如果一个人预期某种行为会导致积极的结果，那么他可能更频繁地选择这种行为，反之，如果预期是负面的，则可能避免该行为 (Li et al., 2023)。个体接收到连续的成功反馈时，他们可能会增加努力以维持或增强这种成功的感觉；相反，连续的失败反馈可能会导致个体减少努力或改变行为目标 (Becker, 1967; Hattie & Timperley., 2007)。前述提到，主导感的产生受预期结果和实际结果的匹配程度的影响。当实际反馈与预期相符时，会增强个体的主导感；反之，如果连续的反馈与预期不符，可能会导致主导感的下降。可见，以往研究从不同的角度来解释连续反馈对个体的影响，基于主导感的动态假说，我们推测连续反馈对个体的影响主要是预期或预测误差的改变。

目前，只有少数主导感研究关注了连续反馈的作用。例如，Di Costa 等 (2018) 的研究发现当人们可以从先前的负面结果反馈中学习时，他们会在下一试次中感到更多的控制，即主导感增强（post-error agency boost, PEAB）；而当他们因随机反馈而无法学习时，这种主导感增强的效果就消失了。Di Costa 等 (2018) 关注的是同一项任务里连续结果反馈对后续主导感的影响，Majchrowicz 等 (2020) 在其研究基础上进一步探讨了一项任务的结果反馈是否会引起后续不同任务主导感的变化。结果发现，只有当被试能够根据当前任务中的错误反馈调整行为时，才会导致该任务后续的主导感增强，即只发生在同一任务的两个试次之间，在跨任务中不存在。上述研究均是在可学习的条件下来研究连续结果反馈对主导感的影响，Oishi 等 (2018) 的研究使用连续动作任务，分离了动作结果的自我评估和动作结果的客观评价（即结果的反馈）对主导感的影响。结果表明，连续动作任务中的主导感不仅受到任务过程中预期与实际结果比较的影响，还受到结果反馈产生的回顾性影响。Oishi 等 (2019) 后续使用连续动作任务并控制结果反馈，发现在无法学习的情况下，连续两次成功后，被试的

主导感也会增强，而连续失败三次后的主导感水平没有发生变化。Ren 等 (2023) 通过操纵先前结果的频率（3~4 次 vs 0 次）发现在特定组块或前几个试次的高结果频率会诱发更高的主导感。这些研究已经证明多次结果反馈影响主导感，但仍有一些矛盾和不足。例如，Di Costa 等 (2018) 和 Oishi 等 (2019) 的研究结果存在一些冲突，前者发现在随机条件下连续结果反馈并不会跨试次影响主导感，而后者却发现连续结果反馈会跨试次影响主导感，可能是因为两项研究采用了不同的主导感测量方法。此外，这几项研究均局限于四次及以下的相同结果效价反馈，没有关注更多次数的结果反馈，难以揭示主导感的动态变化趋势，限制了结果的可推广性，但仍为本研究提供了基础。

已有研究表明高时间分辨率的事件相关电位（event-related potential, ERP）技术可以揭示随着连续反馈次数增加的神经机制 (Bachman et al., 2022; Hassall et al., 2023)。单次结果反馈加工常从反馈刺激出现前的结果预期阶段和反馈刺激出现后的结果加工阶段来探究，但连续反馈加工的神经机制鲜少有人研究。Hassall 等 (2023) 的研究使用脑电图（EEG）检测人类在连续反馈任务中的大脑活动，并检验了这一活动是否与奖励预测误差（Reward Prediction Errors, RPEs）假说相符，结果发现在连续反馈时被试大脑的 EEG 活动显示出与刺激前负波（stimulus-preceding negativity, SPN）一致的地形图和时间过程，且与 RPEs 假说预测一致，预期奖励提示的波幅相比于意外奖励提示有所减少。SPN 是一个对即将到来的刺激产生期待和注意的非运动性头皮慢电位，其波幅会随着反馈刺激的接近而逐渐增大，在反馈刺激出现之前的 200 毫秒内达到最大值 (李琪 等, 2017)。以往研究已经证明了对获得积极结果的期望增强会诱发更负的 SPN (Meng & Ma, 2015; Zheng et al., 2015)。多项研究也证实，奖励相关反馈前 SPN 升高，尤其当反馈与金钱有关时 (Ohgami et al., 2004, 2006; Foti & Hajcak, 2012; Fuentemilla et al., 2013; Hackley et al.,2020)。因此，本研究将采用 SPN 来监测随着反馈次数的增加，结果预期阶段的神经机制变化。

在结果加工阶段，以往研究使用反馈相关负波（feedback related negativity, FRN）和 Feedback-P3 波（Fb-P3）进行刻画 (Li et al., 2011; Yeung et al., 2005)。FRN 是由代表行为错误或失去金钱等负性反馈刺激所诱发的脑电成分，出现在结果反馈呈现后 250~300 毫秒左右 (李鹏, 李红, 2008)。Fb-P3 是 FRN 之后的顶叶正偏转，在反馈后 350~600 毫秒之间达到峰值 (Mei et al., 2018)，是与注意分配和结果评估相关的 ERP 成分。Majchrowicz 等 (2020) 使用反转学习任务发现前一个试次是损失结果时，当前试次的 FRN 波幅会降低，而当前试次的结果对 FRN 振幅不产生影响，表明了先前损失的下游效应。同样，前一个试次是损失结果，当前试次的 P3 振幅会增大，而当前试次是损失结果时 P3 振幅会更大，表明 P3 成分没

有区分当前试次和先前试次的影响，但可能对不同结果效价表现出不同的敏感度。但也有研究发现当两次反馈在同一试次内连续发生时，第二次反馈时（无论积极或消极反馈）的 FRN 波幅会更大，表明大脑在处理当前反馈时会整合先前的反馈信息 (Li et al., 2023)。这两项研究只关注了连续反馈两次时的大脑活动，Osinsky 等人 (2012) 的研究调查赌博任务中决策结果的三重试验顺序是否影响 FRN 和 Fb-P3，结果发现 FRN 和 Fb-P3 前两次结果与第三次结果效价相反时振幅最大。也有研究采用气球模拟风险任务，发现 FRN 波幅会随着反馈次数的增加（风险的逐步升级）而呈线性增长 (Kiat et al., 2016)。Ulrich 和 Hewig (2018) 让被试预测一个“掷硬币”范式的结果，该范式被设置为连续三个相同结果的序列，结果没有发现 FRN 的序列效应，但监测到了 Fb-P3 中的序列效应。可见，这些研究采用不同的范式在较少次数反馈下的结果虽不一致，但均反应了 FRN 和 Fb-P3 对连续收益/损失的差异化敏感。Bachman 等 (2022) 的研究使用简单赌博反馈任务操纵 1 到 8 次的连续收益和损失反馈，并提取与 FRN 和 P300 相关的频段来评估结果和序列对神经活动和行为的影响，结果显示 delta 和 theta 对连续结果的敏感性不同，delta 在连续增益时活动增加，在连续损失时活动减少，而 theta 在连续增益时活动持续增加，在连续损失时活动保持稳定。该研究并未探讨主导感的动态变化机制，但为更长次数的连续结果反馈研究提供了思路。

也有研究表明 ERP 技术可以很好地揭示主导感在时间进程上的变化规律 (Caspar et al., 2016; 赵科 等, 2021)。研究表明，FRN 对行动结果的感知可控性很敏感，当被试认为结果不受控时，收到负面结果后 FRN 的波幅会大大降低 (Li et al., 2011; Yeung et al., 2005)。Sidarus 等 (2017) 的研究直接证明了较大的 FRN 波幅与较高的主导感评级相关。Fb-P3 也被证明与主导感有关 (Kühn et al., 2011)。钟毅平等 (2023) 的研究梳理以往的文献发现，所有的研究均采用控制感评分以测量外显主导感，认为控制感评分是测量主导感的有效方法。因此，本研究参照 Bachman 等 (2022) 研究的连续反馈操纵设置，并将其与主导感的外显测量相结合，用上述三种 ERP 成分分别从结果预期与连续反馈加工认知阶段刻画主导感在连续反馈下的变化规律及其电生理特征。

综上，本研究拟采用行为和 ERP 技术，通过简单赌博任务和主导感的外显测量范式，操纵连续结果反馈的次数，考察主导感是否以及如何随连续反馈累积而动态变化，同时研究其背后的认知神经机制。研究假设如下：1、收益反馈条件下的主导感高于损失反馈；2、存在连续反馈影响的动态变化效应，主导感在收益和损失下的变化模式可能不同；3、不同长度的连续反馈条件在 FRN、Fb-P3 和 SPN 波幅上存在差异，且上述脑电成分与主导感水平有关。

2 方法

2.1 被试

本研究实验范式中的连续反馈序列参照自 Bachman 等人 (2022) 近期发表的研究，因此沿用与其相近的样本量(N = 35)。考虑到脑电实验中可能存在数据伪迹等问题，本研究招募了 40 名大学生被试参与实验。被试均为右利手，视力正常或矫正后正常，无精神病史。在正式实验中，两名被试因在实验过程中动作幅度过大导致 EEG 数据伪迹过多被排除在外，最终，纳入分析的有效被试为 38 名，其中男生 18 人，女生 20 人，平均年龄为 20.79±1.70 岁。本研究经由所在单位伦理审核委员会批准（四川师范大学-2023LS007）。

2.2 实验设计

采用 2（结果效价：收益，损失）×8（连续反馈次数：1~8）的被试内设计，因变量为外显主导感评级得分，以及 ERP 成分（SPN、FRN、Fb-P3）的平均波幅。

2.3 实验程序

实验采用 E-prime2.0 软件进行编程。实验任务为简单赌博任务，被试需要在两扇相同的门之间进行选择，猜测哪扇门后藏有奖励。在每个试次开始，首先是 500ms 的白色注视点“+”，而后被试需要在两扇相同的门之间进行选择，通过按“f”键选择左边的门或者按下“j”键选择右边的门。在被试做出反应之后屏幕上呈现注视点 2000ms，随后呈现 800~1000ms 的结果反馈，通过反馈来提示被试是否正确选择了藏有奖励的门。如选择正确则会呈现“+10”的反馈，表明收益；如选择不正确则会呈现“-10”的反馈，表明损失。接着被试需要进行主导感自评，具体问题是“你认为结果在多大程度上受你控制”。被试需按下相应的数字键（1~9）进行反应，其中“1”代表极小控制，“9”代表极大控制。每个试次后都设置了 900~1100ms 的随机长度间隔。

实验过程中系统地操纵连续收益或连续损失的结果，试次以伪随机次序呈现。无论被试如何选择，都会出现特定的收益或损失序列。这是为了能够匹配两种条件之间的结果，以此探讨主导感的变化趋势。实验流程和连续反馈试次操纵如图 1、图 2 所示。

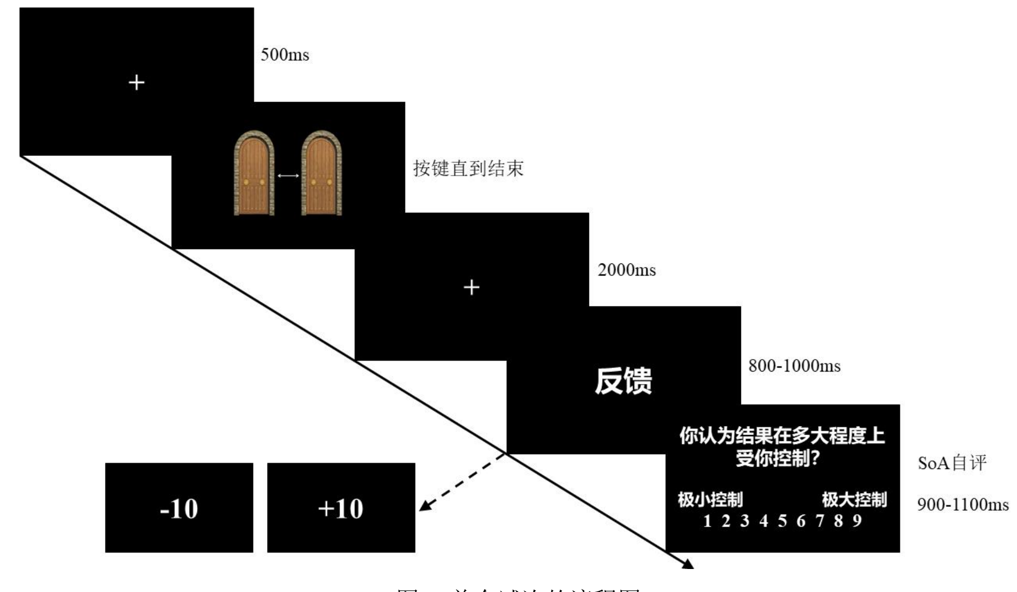


图 1 单个试次的流程图

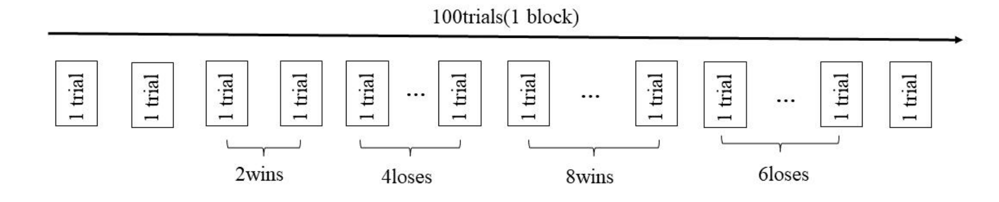


图 2 一个 block 的连续反馈试次（trial）操纵示意图

正式任务包括了 300 个试次（150 个收益试次和 150 个损失试次），共 3 个 block，每个 block 之间有 5 分钟的休息时间。连续反馈序列参照 Bachman 等人 (2022) 的研究设置，具体如表 1 所示，单次收益“+10”（结果反馈 1 次）会在整个实验中出现 12 次，有效分析试次数为 39 个试次；连续 2 个试次收到“+10”（结果反馈 2 次）会出现 9 次，有效分析试次数为 27 个试次；连续 4 个试次收到“+10”（结果反馈 4 次）会出现 3 次，有效分析试次数为 18 个试次；连续 6 个试次收到“+10”（结果反馈 6 次）会出现 6 次，有效分析试次数为 15 个试次；连续 8 个试次收到“+10”（结果反馈 8 次）会出现 9 次，有效分析试次数为 9 个试次。

表 1 反馈序列设置

连续反馈次数	操纵出现次数(收益/损失)	对应试次总数	有效分析试次数
1	12	12	12+9+3+6+9=39
2	9	18	9+3+6+9=27
3	/	/	18
4	3	12	3+6+9=18
5	/	/	15
6	6	36	6+9=15
7	/	/	9
8	9	72	9

虽并未直接设置连续反馈为 3、5、7 的反馈序列，但在分析中，连续反馈 3 次的有效分析试次数为 18 个试次，连续反馈 5 次的有效分析试次数为 15 个试次，连续反馈 7 次的有效分析试次数为 9 个试次。损失序列“-10”反馈的设置同理。在整个实验中，收益和损失序列是交替进行的，出现“+10”和“-10”的反馈概率各为 50%。且为了使最终结果看起来是随机的，最后 4 个试次的结果是单次收益和损失交替出现。

正式任务之前，研究者向被试讲解指导语，而后会提供练习任务让被试熟悉实验流程。在练习阶段，结果反馈是完全随机的，没有设置特定的结果序列。整个任务结束后，会根据被试的认真程度发放被试费，询问被试是否发现结果规律。

2.4 脑电记录和预处理分析

脑电数据采用 Brain Products 公司生产的基于国际 10-20 系统的 64 导脑电记录系统及其配套脑电帽（actiCHamp, Brain Products, Munich, Germany）采集。在记录过程中，全部电极的阻抗均维持在 10kΩ以下，滤波带通设置为 0.01~100Hz 之间，采样频率为 1000Hz，参考电极为 FCz，同时采用贴在被试右眼下约 1cm 左右的表面电极记录眼电（EOG）信号。

使用基于 MATLAB R2022b（MathWorks）的 EEGlab 和 ERPlab 工具包对采集的脑电数据进行离线预处理。首先，进行通道的定位并加入在线参考电极 FCz 的数据。为排除低频漂移与高频噪音信号干扰，对数据采用无限脉冲响应滤波器（IIR-Butterworth filters）进行滤波，高通阈限为 0.1Hz，低通阈限为 30Hz。使用 EEGlab 自带的独立成分分析（Independent Component Analysis, ICA）方法对伪迹（眼动、眼电及肌电）进行校正。随后，使用左、右乳突的平均振幅对 ICA 校正过的数据进行重参考，并将数据分段。根据前人的研究，针对结果预期阶段的 SPN 成分，选取反馈呈现前 2000ms 到呈现后 200ms 的脑电数据，使用-2000ms 至-1800ms 的平均波幅作为基线 (Yi et al., 2018)。在结果反馈加工阶段，选取反馈刺激呈现前 200ms 至出现后 800ms 作为时间窗，使用反馈呈现前 200ms 进行基线校正 (Majchrowicz et al., 2020; Fan et al., 2023; Meng & Ma, 2015)，用以分析 FRN 和 Fb-P3 成分。

2.5 数据分析

2.5.1 行为数据分析

(1) 为探究主导感在连续反馈下的变化趋势，采用 2（结果效价：收益、损失）×8（连续反馈次数：1~8）的两因素重复测量方差分析，测量被试在反馈呈现后的主导感评级变化；并将各连续反馈次数的主导感评级与 5 进行单样本 t 检验，考察被试对结果的归因方向，检验值设为 5，主导感评级显著高于 5 代表对结果进行较高内归因，低于 5 则代表对结果进行外归因或较低的内归因。

⑵为揭示收益和损失下主导感的变化模式，以连续反馈次数为自变量，主导感为因变量，在 R 中使用 lm 函数分别建立收益和损失条件下的线性、指数、对数、二次多项式函数模型，进行模型拟合比较。若有变点，则进一步使用 changepoint 包进行探索分析，探究变点在连续反馈的第几次出现。

⑶为探索连续反馈效价反转后主导感的变化，即连续收益后经历损失时的主导感变化和连续损失后经历收益时的主导感变化，分别对收益和损失条件下的主导感进行配对样本 *t* 检验。

⑷为了评估连续结果反馈是否引起随后行为偏差，在实验中关注后一试次选门重复率，以反映连续反馈操纵对被试行为的强化。具体指被试会再次选择前一试次选择的门（即重复按下“f”或“j”），选择重复率是用直接选择重复次数除以每个条件的试次总数。因此，本研究采用 2（结果效价：收益、损失）×7（连续反馈次数：2~8）重复测量方差分析探究连续反馈对随后试次选择重复率的影响。

2.5.2 ERP 数据分析

鉴于连续反馈 6、7、8 次在后续 ERP 分析中脑电波幅的试次叠加较少。因此，将相同效价单独反馈 1 次和连续反馈 2 次作为“不连续”反馈条件，即分析时选择连续反馈序列中的第 1、2 个试次作为分析试次；相同效价连续反馈 3~5 次作为“短连续”反馈条件，即分析时选择连续反馈序列中的第 3、4、5 个试次作为分析试次；连续反馈 6~8 次作为“长连续”反馈条件，即分析中选择连续反馈序列中的第 6、7、8 个试次作为分析试次。

根据前人的研究并结合本实验结果差异波及脑电地形图，关注反馈呈现前预期阶段的 SPN (Meng & Ma, 2015)，以及反馈呈现阶段的 FRN 和 Fb-P3 两种脑电成分 (Yi et al., 2018; Majchrowicz et al., 2020)。SPN 成分在额叶区域被观察到，结合前人研究，本实验采用反馈呈现前 200~0ms 左右额叶区域的电极点（F1、F2、F3、F4、F5、F6、FC1、FC2、FC3、FC4、FC5、FC6）的平均波幅 (Masaki et al., 2006; Yi et al., 2018) 作为 SPN 波幅。由于 SPN 在反馈出现之前，直接讨论反馈的效价对 SPN 的影响是不合理的 (高杰, 2023)，因此分别对收益和损失下的 SPN 波幅进行 3（连续反馈类型：不连续，短连续，长连续）×2（额叶区域：右，左）的两因素重复测量方差分析。结合本实验中收益与损失的差异波发现 FRN 成分在额中央区最正，因此采用该脑区的三个电极点（FCz、FC1、FC2）在反馈呈现后的 270~330ms 时间窗内的平均波幅作为 FRN 波幅。Fb-P3 成分在顶部脑区被观测到，因此选择该脑区的六个电极点（Pz、P1、P2、CPz、CP1、CP2）在反馈呈现后的 330~420ms 的平均波幅作为 Fb-P3 波幅。随后分别对 FRN、Fb-P3 成分进行 2（结果效价：收益，损失）×3（连续反馈

类型：不连续，短连续，长连续）两因素重复测量方差分析。

所有数据采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行重复测量方差分析和事后检验及 *t* 检验，并在 R4.3.2 RStudio 中使用 lm 函数进行模型拟合，在 R 中使用 ggplot2 (Villanueva & Chen, 2019) 进行图形可视化，使用 changepoint 包 (Killick & Eckley, 2014) 进行变点分析。将 *p* 值小于 0.05 作为显著性阈值，当违背球形检验时，采用 Greenhouse-Geisser 校正，多重比较分析时采用 Bonferroni 校正。

3 结果

3.1 行为结果

在实验结束后通过访谈来询问被试是否发现结果反馈存在规律性，显示所有被试都未察觉结果的规律性。

3.1.1 连续反馈对主导感的影响

为了探究连续反馈能否以及如何影响主导感，对主导感自评得分进行 2（结果效价：收益，损失）×8（连续反馈次数：1~8）的两因素重复测量方差分析，发现结果效价的主效应显著，$F(1, 37) = 95.18$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.72$，收益反馈条件下的主导感评分显著高于损失反馈。连续反馈次数的主效应显著，$F(7, 259) = 17.87$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.33$，且结果效价和连续反馈次数的交互作用显著，$F(7, 259) = 38.15$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.51$。

进一步简单效应分析表明，在收益条件下，单独 1 次收益后的主导感显著低于连续 2~8 次 (*p*s < 0.001)，连续 2 次收益后的主导感得分显著低于连续 3~8 次 (*p*s < 0.001)。连续 3 次收益后的主导感得分显著低于连续 4~8 次 (*p*s < 0.01)。连续 4 次收益后的主导感得分显著低于连续 5~8 次 (*p*s < 0.05)，连续 5 次收益后的得分显著低于连续 6 次 (*p* = 0.003)，且连续 6~8 次收益后的主导感得分无显著差异 (*p*s > 0.05)，具体显著性值见附表 1。在损失条件下，连续损失 2 次后的主导感得分显著高于 6~8 次 (*p*s < 0.05)，连续损失 3、5 次后的主导感得分显著高于连续 7 次 (*ps* < 0.05)，其他均无显著差异 (*ps* > 0.05)。具体显著性值见附表 2。

主导感的变化如图 3 所示，为了考察连续反馈次数对主导感内外归因的影响，分别对各个连续反馈次数的主导感得分进行了单样本 *t* 检验，检验值设为 5。结果发现，在收益条件下，单独 1 次收益后的主导感得分显著低于 5，$t(37) = -2.03$，$p = 0.049$，反馈 2 次和反馈 3 次的主导感得分与 5 没有显著差异 (*p*s > 0.05)，但反馈 4 次及以上次数，主导感得分均显著高于 5，*p*s < 0.001，具体显著性值见附表 3。所有连续损失条件下的主导感均显著低于 5，*p*s < 0.001，具体显著性值附表 4。

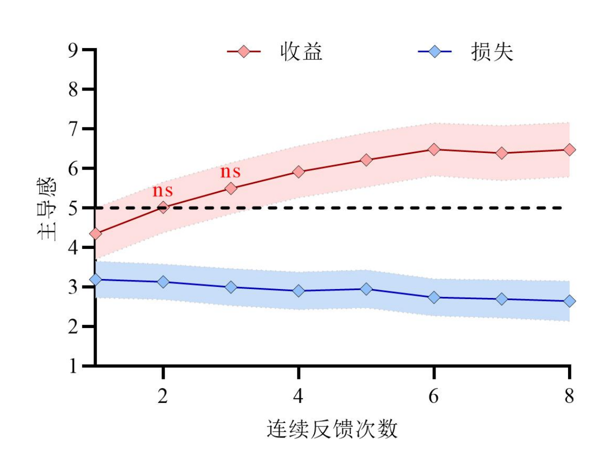


图 3 主导感随连续反馈变化的折线图 (浅色为 95%置信区间，*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$。ns, 不显著)

根据上述结果，对连续反馈影响主导感的实验操纵进行检验分析，考察主导感测量是否处于稳定水平，以明确连续反馈对主导感的作用不受实验测量稳定性的混淆。即对收益和损失下的主导感进行 8（连续反馈次数：1~8）×3（组块：block1，block2，block3）的重复测量方差分析，重点关注连续反馈次数与组块之间的交互作用是否显著，结果发现：收益条件下，连续反馈次数与组块间的交互作用不显著，$F(14, 28) = 1.04$，$p = 0.433$，$\eta_p^2 = 0.34$；类似的，损失条件下，连续反馈次数与组块间的交互作用也不显著，$F(14, 28) = 1.06$，$p = 0.426$，$\eta_p^2 = 0.35$。因此，实验中连续反馈对主导感的影响不受测量稳定性的混淆。

此外，为了考察主导感随实验进程是否改变，还检验了不考虑连续反馈操作时的测量稳定性。即分别对收益和损失下的主导感进行单因素方差分析（3 组块：block1，block2，block3），结果发现：收益条件下，组块的主效应不显著，$F(2, 147) = 0.76$，$p = 0.469$，$\eta_p^2 = 0.01$，表明收益条件下的测量是稳定的；损失条件下，组块的主效应显著，$F(2, 147) = 8.84$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.11$，Bonferroni 事后检验结果显示，block1 (3.14±0.39)比 block3 (2.85±0.28)的主导感水平更高，即不考虑连续反馈的作用时，随着实验进程的发展，损失条件下被试的主导感减弱。这一结果提示收益和损失下主导感的变化模式可能存在差异。

3.1.2 收益和损失下主导感的变化模式

统计理论中，近似模型的拟合优度值介于 0 和 1 之间，该数值越接近 1，近似模型拟合越好，表明样本的影响关系越收敛于真实值 (杨振海 等, 2011)，因而，在检验预测模型的近似程度时，常常采用拟合优度值来检验近似模型的收敛效果。首先，在收益条件下，选用不同类型的函数拟合，其中 Model(1)表示一元线性函数拟合，Model(2)表示指数函数拟合，Model(3)表示对数函数拟合，Model(4)表示二次多项式函数拟合。表 2 显示，Model(4)的模型决定系数 R^2 为 0.99，说明二次多项式的拟合优度最高，拟合效果最好，故选二次多项式

模型对收益条件下的主导感的变化模式进行模拟预测。

表 2 收益条件下不同函数的预测模型拟合度检验

模型	*F* 值	R^2	调整后的 R^2	标准化残差
Model(1)	41.10	0.87	0.85	0.30
Model(2)	32.90	0.85	0.82	0.06
Model(3)	300.10	0.98	0.98	0.12
Model(4)	678.30	0.99	0.99	0.05

通过二次多项式的输出结果可知，一次项结果显著，$t(6) = 20.15$，$p < 0.001$；二次项结果显著，$t(6) = -12.98$，$p < 0.001$，包含二次项提高了模型的拟合度，收益条件下主导感评级的预测等式为：主导感 = 3.61 + 0.80×反馈次数 - 0.06×反馈次数 ^{2}，在 $p < 0.001$ 水平下，回归系数均显著，模型的方差解释率为 99.60%。因此，在收益条件下，主导感的变化模式可以通过二次多项式进行预测。其二次多项函数拟合模型如图 4A 所示。变点分析结果显示拐点位于第七次反馈，即在连续积极反馈 7 次前，主导感持续上升，随后不再继续上升。

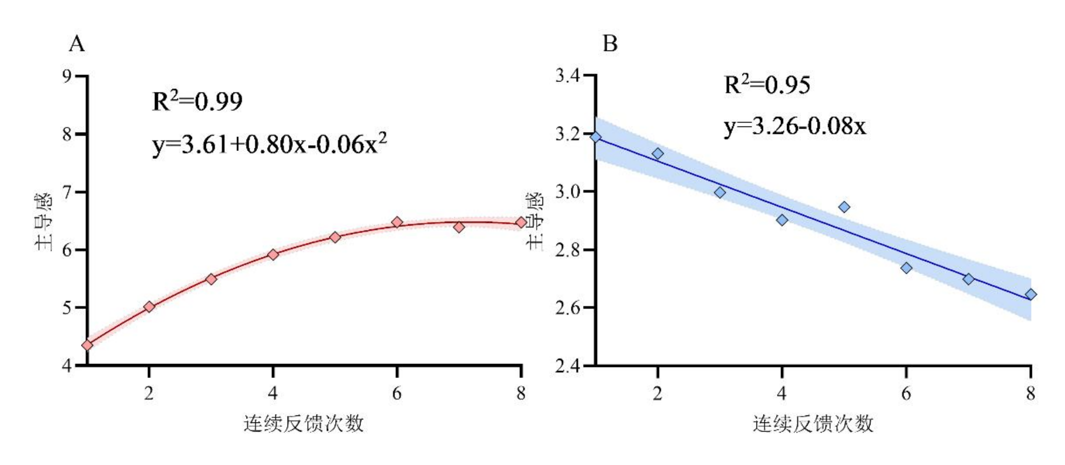


图 4 收益时变化的二次多项式拟合(A)和损失时变化的一元线性拟合(B)

以同样的模型拟合方式，对损失条件下的主导感进行模型预测。其中 Model(5)表示一元线性函数拟合，Model(6)表示指数函数拟合，Model(7)表示对数函数拟合，Model(8)表示二次多项式函数拟合。表 3 结果显示，Model(8)的模型决定系数 R^2 为 0.96，说明二次多项式函数的拟合效果较好，一次项显著，$t(6) = -10.30$，$p < 0.001$，但二次项不显著，$t(6) = 0.34$，$p = 0.750$，因此不适合使用二次多项式函数的拟合作为损失条件下主导感的预测。Model(5)的 R^2 为 0.95，即模型的方差解释率为 95%，根据结果可以得出：主导感 = 3.26 - 0.08×反馈次数，一次项显著，$t(6) = -11.15$，$p < 0.001$，故 Model(5)一元线性函数对损失时的主导感变化模式的预测效果最佳。即随着连续反馈次数的累积，主导感会持续降低。其一元线性函

数拟合如图 4B 所示。

表 3 损失条件下不同函数的预测模型拟合度检验

模型	*F* 值	R^2	调整后的 R^2	标准化残差
Model(5)	124.40	0.95	0.95	0.04
Model(6)	6.93	0.54	0.46	0.14
Model(7)	49.38	0.89	0.87	0.07
Model(8)	53.10	0.96	0.94	0.04

3.1.3 连续反馈对结果效价反转后主导感的影响

连续收益后损失。不同连续收益次数后经历损失时主导感的变化如图 5A 所示，无论先前获得过多少次收益，在经历 1 次损失后被试的主导感都会降低。对连续收益 2 次后损失（$M \pm SD = 3.21 \pm 1.42$）、连续收益 4 次后损失（3.41±1.74）和连续收益 6 次后损失（3.49±1.63）的主导感进行了配对样本 *t* 检验，结果发现只有连续收益 2 次后损失和连续收益 6 次后损失两者间有显著差异，$t(37) = -2.18$，$p = 0.036$。与连续 2 次收益后相比，连续 6 次收益后首次经历损失时的主导感显著更高。

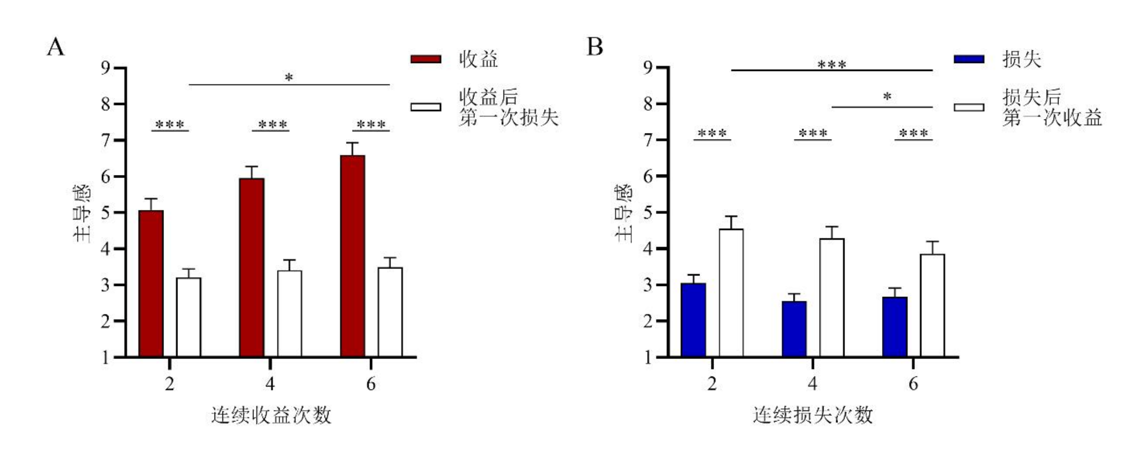


图 5 不同连续长度收益后经历损失时的主导感变化(A)；不同连续长度损失后经历收益时的主导感变化(B) bar 为均值标准误(Standard Error of the Mean,SEM)

连续损失后收益。不同连续损失次数后经历收益时主导感的变化如图 5B 所示，无论先前经历过多少次损失，再经历 1 次收益后被试的主导感都会升高。对连续损失 2 次后收益（4.56±2.10）、连续损失 4 次后收益（4.28±2.04）和连续损失 6 次后收益（3.86±2.11）的主导感进行配对样本 *t* 检验，结果发现与连续损失 6 次收益后相比，连续损失 2 次，$t(37) = 5.85$，$p < 0.001$，和连续损失 4 次后收益的主导感显著更高，$t(37) = 2.65$，$p = 0.012$；连续损失 2 次和 4 次后收益的主导感之间无显著差异。

3.1.4 连续反馈对随后试次选择重复率的影响

为了探究连续反馈对随后试次选择重复率的影响，将选择重复率作为因变量，使用 2（结果效价：收益、损失）×7（连续反馈次数：2~8）重复测量方差分析，结果显示，效价的主效应显著，$F(1, 37) = 18.89$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.34$，收益条件下的重复率（0.66±0.05）显著高于损失条件下的重复率（0.45±0.02），说明收益结果后被试更倾向于重复选择。连续反馈次数的主效应显著，$F(7, 259) = 3.15$，$p = 0.005$，$\eta_p^2 = 0.08$，事后检验经过 Bonferroni 校正之后条件之间差异均不显著。结果效价和连续反馈次数的交互作用显著，$F(7, 259) = 2.22$，$p = 0.042$，$\eta_p^2 = 0.06$，在 2~6 次反馈 ($ps < 0.001$)，7 次反馈 ($p = 0.012$)，8 次反馈后 ($p = 0.002$)，收益下的选择重复率均显著高于损失下的选择重复率；在收益和损失下比较连续反馈次数后的选择重复率，事后检验经过 Bonferroni 校正之后条件之间差异均不显著。

3.2 事件相关电位分析

3.2.1 结果预期阶段刺激前负波 (SPN)

收益条件下，对 SPN 的平均波幅进行 3（连续反馈类型：不连续，短连续，长连续）×2（额叶区域：右，左）的重复测量方差分析，结果显示，反馈类型的主效应不显著，$F(2, 74) = 1.14$，$p = 0.326$，$\eta_p^2 = 0.03$。额叶区域的主效应不显著，$F(1, 37) = 0.53$，$p = 0.470$，$\eta_p^2 = 0.01$。反馈类型和脑区的交互作用不显著，$F(2, 74) = 0.05$，$p = 0.947$，$\eta_p^2 = 0.01$（见图 6）。

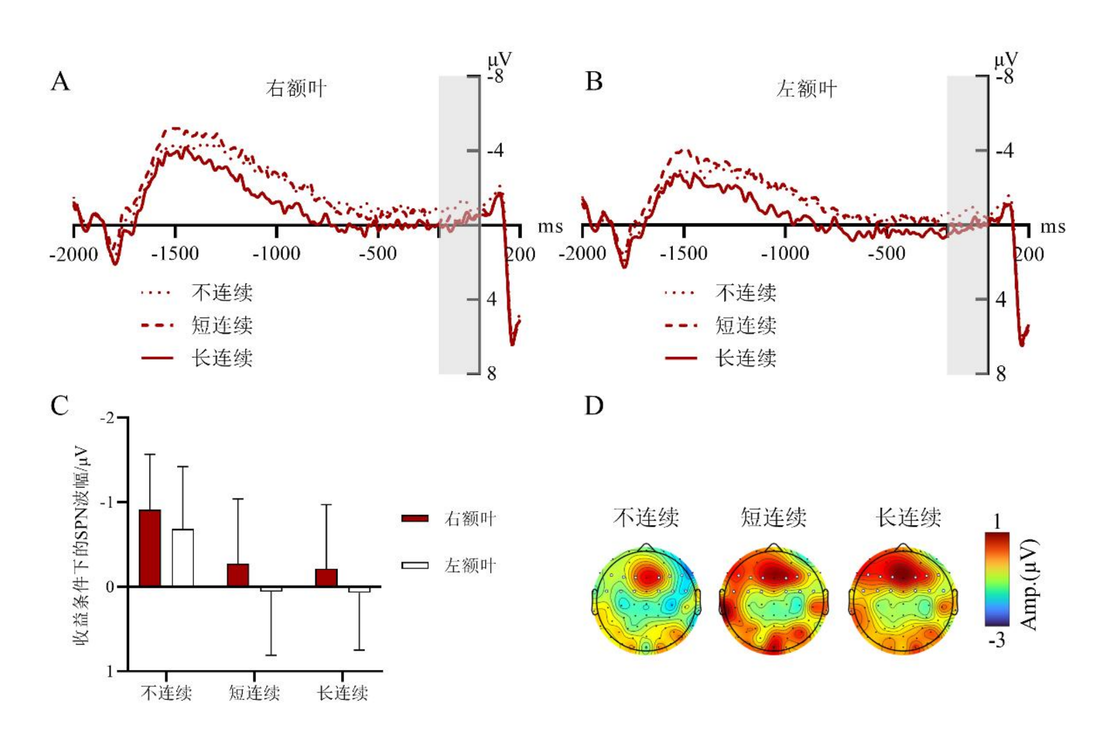


图 6 收益条件下诱发的 SPN 波形图右额叶(A)、左额叶(B)、柱状图(C)、地形图(D)

同理，在损失条件下对 SPN 波幅进行 3（连续反馈类型：不连续，短连续，长连续）×2（额叶区域：右，左）的两因素重复测量方差分析，结果显示，反馈类型的主效应不显

著，$F(2, 74) = 2.58$，$p = 0.105$，$\eta_p^2 = 0.06$。额叶区域的主效应不显著，$F(1, 37) = 0.49$，$p = 0.490$，$\eta_p^2 = 0.01$。反馈类型和额叶区域的交互作用显著，$F(2, 74) = 4.33$，$p = 0.017$，$\eta_p^2 = 0.10$。进一步简单效应分析表明，在右额叶区，长连续（-2.12±0.78）比不连续（-0.09±0.83）诱发更偏负的 SPN 波幅，$F(2, 74) = 4.36$，$p = 0.020$，$\eta_p^2 = 0.20$（见图 7）。

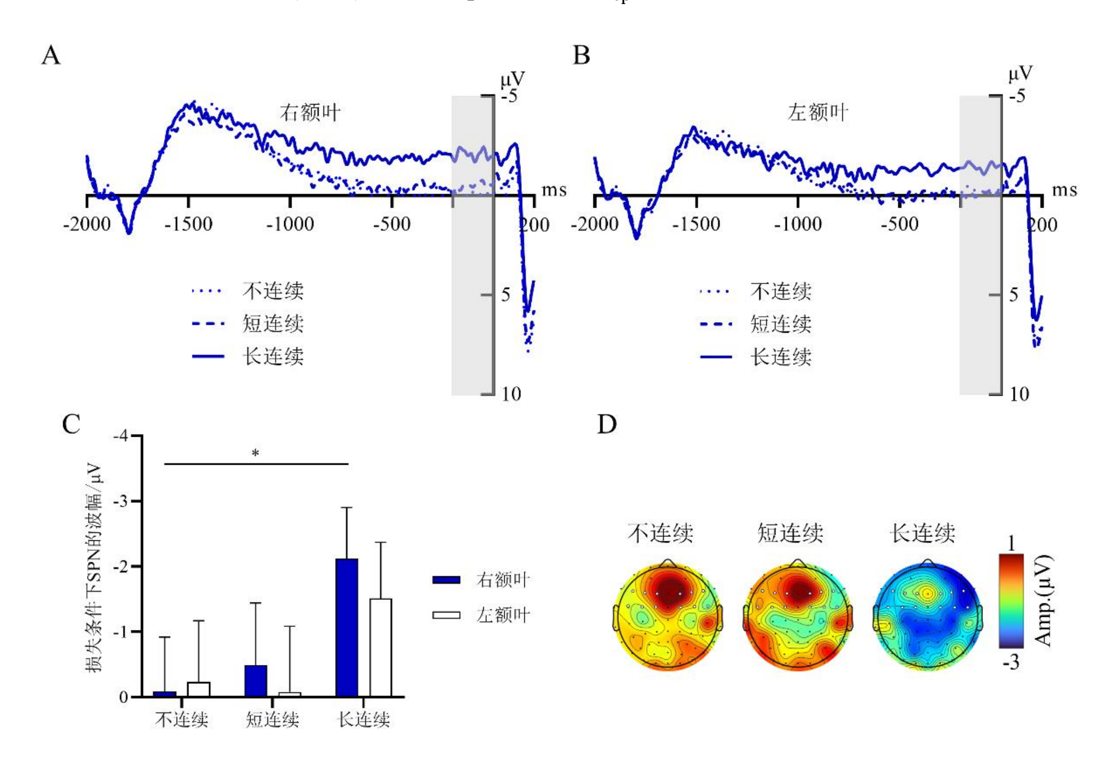


图 7 损失条件下诱发的 SPN 波形图右额叶(A)、左额叶(B)、柱状图(C)、地形图(D)

3.2.2 结果加工阶段反馈相关负波 (FRN)

将 FRN 在 270~330ms 内的平均波幅进行 2（结果效价：收益，损失）×3（连续反馈类型：不连续，短连续，长连续）的两因素重复测量方差分析，发现结果效价主效应不显著，$F(1, 37) = 0.23$，$p = 0.636$，$\eta_p^2 = 0.01$。连续反馈类型的主效应显著，$F(2, 74) = 10.90$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.23$。且结果效价和连续反馈类型的交互作用显著，$F(2, 74) = 6.80$，$p = 0.002$，$\eta_p^2 = 0.16$。

简单效应分析表明，在收益条件下，连续反馈类型的 FRN 波幅之间差异显著，$F(2, 36) = 10.85$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.38$，短连续（3.56±0.77）和长连续（4.20±0.91）反馈比不连续（6.73±0.90）反馈诱发更偏负的 FRN 波幅，前两种实验条件差异不显著。在损失条件下，连续反馈类型的 FRN 波幅之间差异不显著，$F(2, 36) = 1.44$，$p = 0.251$，$\eta_p^2 = 0.07$。

在不连续反馈的条件下，损失（5.35±0.82）比收益（6.73±0.90）诱发更负的 FRN 波幅，$F(2, 37) = 7.40$，$p = 0.010$，$\eta_p^2 = 0.17$。在短连续反馈的条件下，收益（3.56±0.77）比损失（5.18±0.88）诱发更偏负的 FRN 波幅，$F(2, 37) = 5.85$，$p = 0.021$，$\eta_p^2 = 0.14$。在长连续结果反馈的条件下损/益之间 FRN 差异不显著，$F(2, 36) = 0.28$，$p > 0.05$，$\eta_p^2 = 0.01$（见

图 8）。

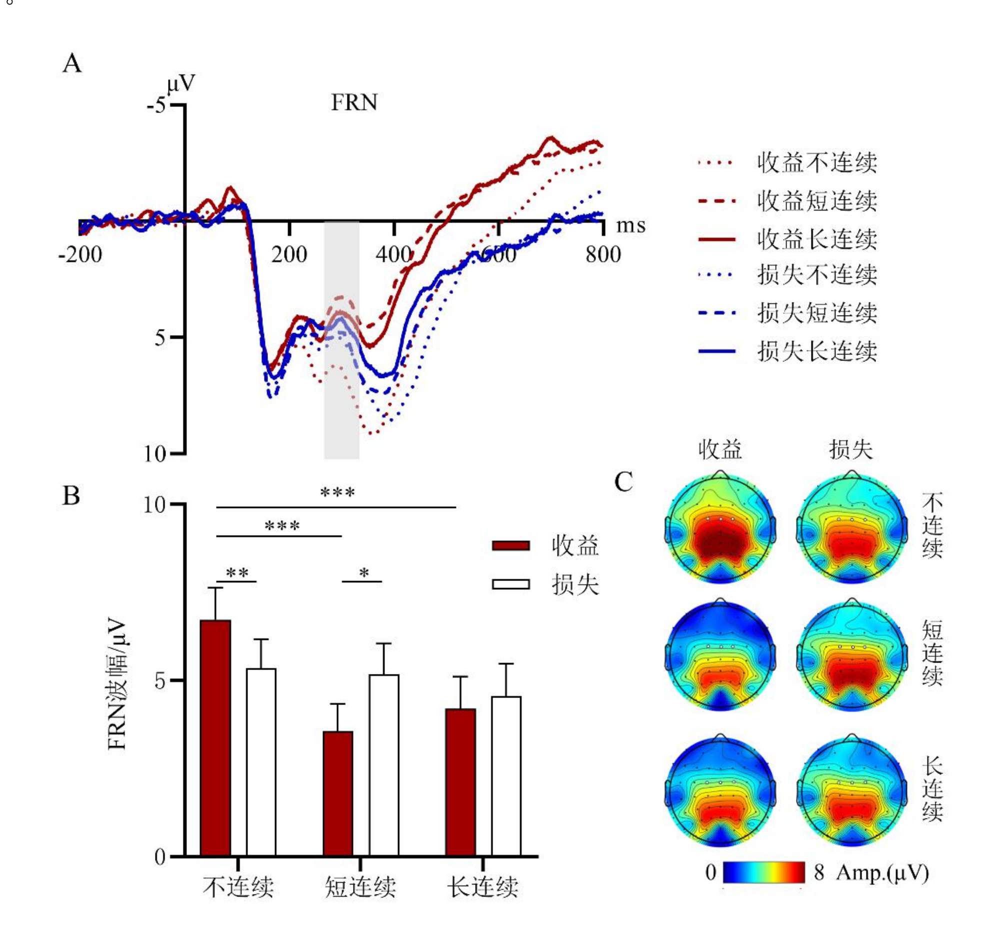


图 8 各实验条件下诱发的 FRN 波形图(A)、柱状图(B)、地形图(C)

3.2.3 结果加工阶段反馈后 P3 (Fb-P3)

对 Fb-P3 的平均波幅进行 2（结果效价：收益，损失）×3（连续反馈类型：不连续，短连续，长连续）的两因素重复测量方差分析，发现结果效价主效应显著，$F(1, 37) = 8.21$，$p = 0.007$，$\eta_p^2 = 0.18$，连续反馈类型的主效应显著，$F(2,74) = 23.38$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.39$，且结果效价和连续反馈类型的交互作用显著，$F(2,74) = 11.28$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.23$。

简单分析效应表明，在收益条件下，不连续反馈（9.32±0.74）比短连续（5.98±0.60）和长连续反馈（6.23±0.65）诱发更正的 Fb-P3 波幅，$F(2, 36) = 20.03$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.53$，短连续和长连续反馈诱发的 Fb-P3 波幅之间不存在显著差异($p > 0.05$)。在损失条件下，短连续（8.38±0.65）比长连续（7.65±0.66）反馈诱发显著更正的 Fb-P3 波幅，$F(2, 36) = 4.37$，$p = 0.020$，$\eta_p^2 = 0.20$，长连续和不连续（8.72±0.70）反馈之间呈边缘显著 ($p = 0.059$)。

在不连续反馈下，收益和损失之间的 Fb-P3 波幅差异不显著，$F(1, 37) = 1.79$，$p = 0.189$，$\eta_p^2 = 0.05$。在短连续反馈下，$F(1, 37) = 23.71$，$p < 0.001$，$\eta_p^2 = 0.39$，损失（8.38±0.65）比收益（5.98±0.60）反馈诱发显著更正的 Fb-P3 波幅。在长连续反馈下，$F(1, 37) = 5.05$，$p =$

0.031，η_p^2 = 0.12，损失(7.65±0.66)同样比收益(6.23±0.65)诱发更正的 Fb-P3 波幅（见图 9）。

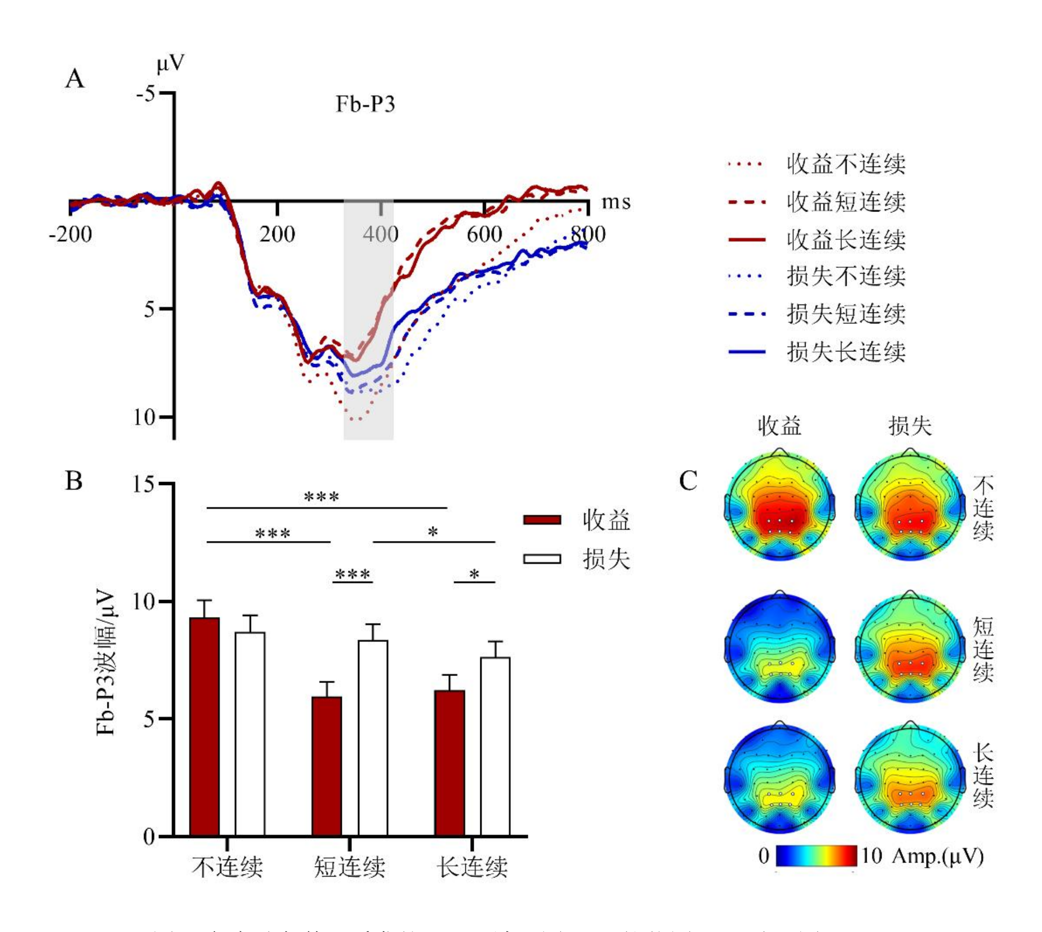


图 9 各实验条件下诱发的 Fb-P3 波形图(A)、柱状图(B)、地形图(C)

3.3 ERP 与行为结果的相关

为探究脑电指标与行为结果之间的关系，对 6 种条件（收益不连续、收益短连续、收益长连续、损失不连续、损失短连续、损失长连续）下 ERP 波幅（SPN、FRN、Fb-P3）与当前试次主导感评级和下一试次选择重复率进行皮尔逊相关分析。结果显示，对于下一试次选择重复率，在收益不连续条件下，左额叶的 SPN 波幅与下一试次选择重复率呈显著负相关，r (38) = -0.35, p = 0.030（见图 10A），左额叶的 SPN 波幅越负，下一试次选择重复率越高。在收益短连续和长连续条件下，FRN 波幅与下一试次选择重复率均显著负相关，短连续：r (38) = -0.35, p = 0.029（见图 10B），长连续：r (38) = -0.40, p = 0.012（见图 10C），FRN 波幅越负，下一试次选择重复率越高。其余相关不显著 (ps > 0.05)。

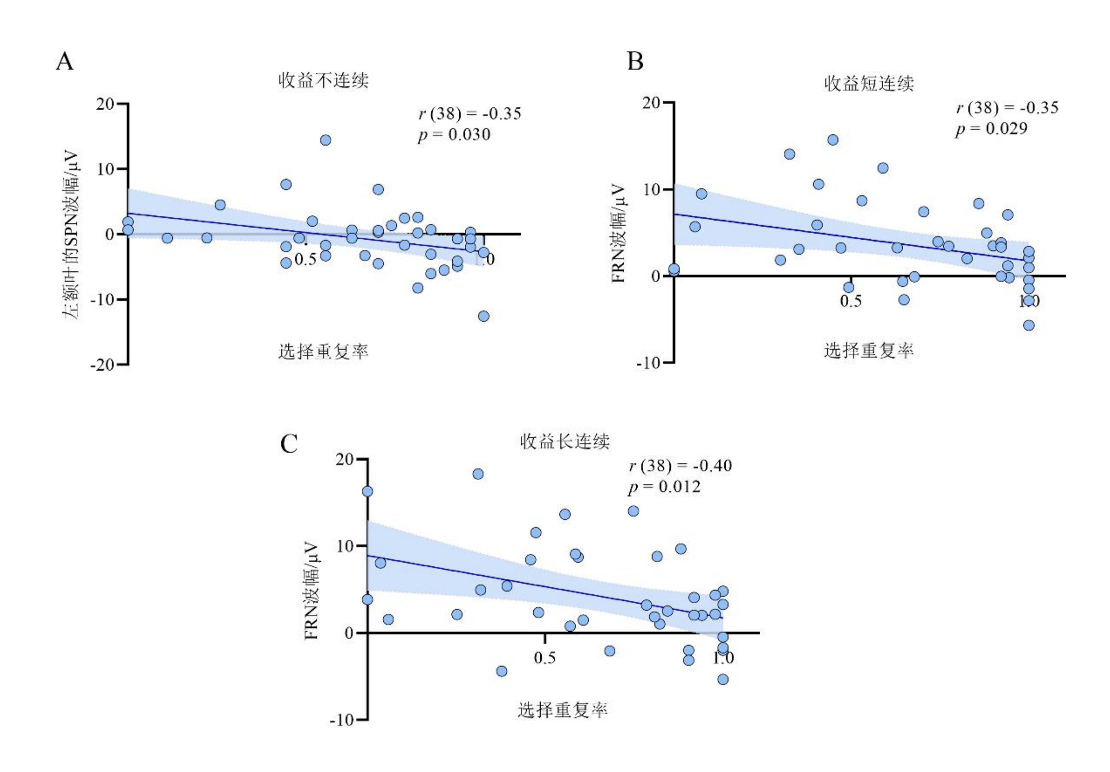


图 10 收益不连续下选择重复率与左额叶 SPN 波幅之间的关系图(A)，收益短连续下选择重复率与 FRN 波幅之间的关系图(B)，收益长连续下选择重复率和 FRN 波幅之间的关系图(C)

4 讨论

本研究结合行为实验和 ERP 技术，通过简单赌博任务和主导感的外显测量方式，操纵连续结果反馈的次数，首次考察主导感在连续多次结果反馈下的变化模式。行为结果与以往研究一致，发现损失条件下的主导感显著低于收益条件下的主导感 (Kulakova et al., 2017; Herman & Tsakiris, 2020; Kaiser et al., 2021)。更重要的是，我们发现连续多次的结果反馈对主导感产生动态的影响，但连续收益和连续损失的影响模式不同。在收益条件下，主导感的变化符合二次多项式模型，随着连续收益增加，呈现先增加至拐点后趋于平缓的趋势。在损失条件下，主导感的变化模式符合一元线性模型，随着连续损失反馈逐渐减弱。结合 ERP 和行为结果发现，与不连续损失相比，连续损失期间，结果反馈前的右额叶 SPN 波幅更负；FRN 波幅对收益的连续性敏感，与不连续收益相比，连续收益下 FRN 波幅更负，且与随后更高的行为选择重复率有关；与连续收益相比，连续损失会诱发更大的 Fb-P3 波幅。由此可见，收益和损失下主导感的变化在行为和脑电上均呈现差异化的动态发展机制。

4.1 连续反馈下收益和损失对主导感影响趋势不同

本研究发现主导感会随着反馈连续长度的累积而持续变化，且在收益和损失下表现出不同的变化模式，这体现了主导感的“动态”变化可塑性。收益反馈条件下的主导感显著高于损失反馈条件，这与以往关于主导感的研究结果一致 (Kulakova et al., 2017; Herman &

Tsakiris, 2020; Kaiser et al., 2021; Fan et al., 2023)。以往研究采用认知上的自我服务偏差理论进行解释，即人们倾向于把积极结果归因于内部，而将消极结果归因于外部 (Mezulis et al., 2004)。

在收益反馈下，第一次反馈后的主导感评级显著低于 5，表明个体在第一次反馈之后对结果进行较低的内归因，可能认为收益更多由外部原因导致的。随着收益反馈次数的增加，四次后主导感的评级显著高于 5，在这个过程中个体对结果的归因逐渐转为较高自我归因，可能个体更倾向认为收益的结果是自身选择动作导致的，对环境有较高的控制，从而使主导感评级逐渐上升。收益下个体倾向于重复上一轮的选择也说明了是个体认为自身动作导致的结果。主导感在第 7 次反馈后达到主观最高点，这时个体对环境的主导感最强。7 次反馈后，主导感水平不再上升，可能的原因在于反馈效价对主导感的影响，不但取决于反馈本身，还取决于行为与反馈的关系，即持续得到积极反馈后，被试可能开始意识到这些反馈与自身行为并不存在因果关系。这种认识的增加可能会使个体对自身控制的评估变得更加理性，从而导致主导感不再上升。若从情绪体验方面进行阐释，这一现象可能符合边际效用递减定律（Diminishing Marginal Utility） (Berkman et al., 2016)，类似于情感的习惯化和对奖赏的享乐适应（Hedonic Adaptation/Treadmill），即个体逐渐适应重复接触的相同情绪事件，主观价值随之降低，最终产生较小的情绪反应，这有助于个体保持情绪的稳定 (Rusk, 2022)，因此，未来的研究需要采取更有效的方法对其进行更加充分的解释。

只要出现损失反馈，个体的主导感得分就会显著低于“5”，表明只要出现消极结果，个体就会减少对结果的内归因，符合自我服务偏差理论的观点。损失反馈下的变化模式是随着反馈次数的增加，主导感不断降低，与 Di Costa 等人 (2018) 的研究结果不一致，该作者的结果表明，当个体体验到不利的结果时，个体在下一个试次中会感到更多的控制，而不是更少。本研究的结果可能是因为预期与结果长期不一致削弱了主导感，使个体产生外界的一切都不受控制的感觉，无论自己做出什么行为，都无法改变结果 (Haggard, 2017)，这可能是主导感的持续降低的原因。张权伟 (2018) 发现挫折情境（消极反馈多于积极反馈）会导致主导感降低。连续的失败引起了被试的挫败感——当一个人有实现目标的期望，但经过反复尝试仍然未能实现时，就会产生挫败感，而长期的挫败感会导致习得性无助，这也可能是主导感的持续降低的原因。

以连续多次结果反馈为前提，本研究探索性地讨论了结果效价反转后的主导感，发现多次收益后主导感会增强，但只要经历一次损失，被试的主导感就会显著下降。这一结果符合损失厌恶理论的观点，即个体在面对同等价值的收益和损失时，对损失的敏感程度比对收益

的敏感程度更高 (Tversky & Kahneman, 1991)。更重要的是，连续收益六次后首次损失的主导感水平会显著高于连续收益两次后首次损失的主导感水平。这表明多次连续的积极反馈不仅有助于被试主导感的增强，还有助于缓冲随后失败的影响。同样，经历多次损失后会导致被试主导感的减弱或丧失，但只要获得一次成功后被试的主导感就会显著提升，且连续损失2~4次后收益的主导感会显著高于连续损失6次后收益的主导感。说明先前经历的损失越多，在随后的成功中体验到的控制程度较低，多次的失败可能降低了个体对自我能力判断的感知。班杜拉认为自我效能感形成受自我的直接经验、他人的替代经验、他人的言语说服、生理或情绪状态等因素的影响 (Bandura, 1977)。本研究结果印证了不同效价的直接经验对个体的影响差异。

4.2 结果反馈加工时 Fb-P3 对连续损/益的差异化敏感

Fb-P3 对连续损/益的差异化敏感。研究结果显示当反馈次数增加到 3~5 次（短连续）或者更长的 6~8 次（长连续）时，损失均比收益诱发了更正的 Fb-P3 波幅。Fb-P3 被认为是反馈信息的注意水平和动机意义的指标 (Duncan-Johnson & Donchin, 1982)，这可能是因为与保持连续获胜相比，被试更有动力去提高自己的表现以阻止连续失败的发生。这在重复率的行为数据中也得到了证明，表明 Fb-P3 对连续损失和收益的差异化敏感。有研究者最早研究顺序刺激对 ERP 的影响，得出的结果是刺激的变化会导致 P300 振幅的增加，而刺激重复会导致振幅的降低 (Squires, et al, 1976)，显然本研究并不遵循这样的规律，可能是因为刺激是独立于任何奖励或损失操作进行的。Ma 等人 (2018) 探讨了单次结果和连续结果下 P3 的变化，发现无论结果是否连续，与失败的情况相比，获胜诱发的 P3 波幅都会更大，即连续获胜会比连续失败诱发显著更大的 P3。这与本研究的结果相矛盾，这可能是因为 Ma 的实验任务是石头剪刀布的输赢结果，并没有涉及金钱得失，未来可以进一步探究结果性质的影响差异。Kamei 等人 (2018) 发现与连赢相比，连败的 Fb-P3 会更大，这与本研究的结果一致。作者对此解释道，在连败的情况下，被试对结果的兴趣会增加，Fb-P3 的增加正是反映了对结果的兴趣增强，而不是结果重要性的增加。

4.3 连续收益对主导感的影响可能与结果反馈加工时 FRN 波幅有关

Mühlberger 等 (2017) 的研究发现在高感知控制下奖励积极性（reward positivity, RewP）振幅会更正，作者指出在之前的研究中，RewP 被称为反馈相关负波（FRN）、反馈负波（FN）、反馈误差相关负波（fERN）或内侧额叶负波（MFN）。本研究结果显示连续反馈下的 FRN 振幅比不连续反馈下的振幅更负，这可能说明连续反馈降低了被试的感知控制，但这与本研究的收益条件下主导感水平上升结果相矛盾。当反馈结果只是单独出现 1~2 次时，损失会比

收益诱发更负的 FRN 波幅，此结果与前人研究一致 (Peterburs et al., 2013; Walsh & Anderson, 2012; Fan et al., 2023)。但当反馈结果连续出现 3~5 次的情况下时，收益却比损失诱发了更负的 FRN 波幅，结果发生了反转。FRN 被广泛认为是预期违反的神经指标 (李鹏, 李红, 2008; 李丹阳 等, 2018; Fan et al., 2023)，这可能表明当反馈次数增加时，个体对结果的预期也在发生变化。考虑到 FRN 的连续反馈效应只在收益时被观察到，即长连续（6~8 次）与短连续（3~5 次）收益的 FRN 波幅比不连续（1~2 次）时更负；而损失时未在 FRN 上表现出连续反馈条件间的差异。我们推测在连续反馈下，相比连续损失结果，FRN 波幅对连续获益结果更为敏感，间接反映此时个体对积极结果的预期减弱，因此获益时诱发了预期违反的 FRN 成分。另一种理论解释是，FRN 反映的是情绪系统的活动，特别是积极情绪的启动效应，即先前的赢会使下一次赢诱发更正的 FRN 波幅 (Mushtaq et al., 2013, 2016)。根据这种假说，在连续收益反馈后 FRN 波幅应该更正，这与本研究的结果并不一致，我们推测可能是因为在本研究中的连续收益结果反馈削弱了个体积极情绪的启动，这与上述的情感习惯化解释相印证。另一方面，本研究发现在收益 3~5 次和收益 6~8 次反馈后，选择重复率与 FRN 波幅之间呈负相关，表明个体接收到积极结果时，且接收到这种结果的次数越多，个体更倾向于重复选择，且 FRN 波幅越负。这符合 win-stay，loss-switch (WSLS) 策略，与以往相关研究结果一致 (Cassotti et al., 2011; Xue et al., 2012; 2013)。根据行为主义的理论观点，连续收益有利于选择的维持，与强化相关的反应更有可能被重复，而与惩罚相关的反应更有可能被改变。总之，相比连续的损失结果，FRN 波幅与连续获益的加工关系更为密切，可能反映连续获益结果反馈下对积极结果的预期减弱，但促进对积极结果关联行为的强化。

4.4 连续损失对主导感的影响可能与结果预期加工时 SPN 波幅有关

脑电结果显示，连续损失反馈中，与不连续相比，长连续下 SPN 波幅更负，SPN 是奖赏期待的可靠指标 (李琪 等, 2017)，这可能表明较多次数的损失反馈可能使得被试对消极结果的预期增加，或者削弱了被试的奖赏期待。李琪等 (2017) 的综述指出 SPN 拥有稳定的量级效应，即与低量级奖赏相比，高量级奖赏会诱发出更强的 SPN 波幅。在本研究中的收益条件下并未发现这种效应，却在高量级损失条件下表现出了更强的 SPN 波幅。Masaki 等 (2006) 的研究发现，在连续赢两次或三次时，当前试次的 SPN 表现出了更弱（更正）的波幅，连续输两次或者三次时，当前试次的 SPN 表现出了更强（更负）的波幅，这与本研究损失条件下的趋势是一致的。Masaki 等 (2006) 对此作出了两种不同的解释，一是使用赌徒谬误（Gambler's Fallacy）解释该结果，赌徒谬误是一种错误的信念，即认为事件发生的机会率会随着之前没有发生该事件的次数而上升。如果被试按照赌徒谬误行事，他们应该期望

在连续失败后获得收益，并在连续收益后获得损失。那么如果 SPN 代表对积极结果的预期，则在连续亏损后应增加；如果 SPN 代表对消极结果的预期，则在连续收益后应增加。若采用该解释，那么本研究中 SPN 反映的是在连续损失反馈下对积极结果的预期增加。Masaki 等 (2006) 也认为 SPN 反映的是对负面事件（而不是积极事件）的预期，这与 SPN 反映焦虑或唤醒状态的观点是一致的 (Böcker et al., 2001; Takeuchi et al., 2005)。在连续的损失之后，损失将被视为更有可能出现的结果，而在连续收益之后更有可能获得收益。在这种情况下，损失后的 SPN 越大，将反映损失的主观概率越大（即焦虑/唤醒状态）。该作者的研究只分析了 1-3 次的结果反馈，没有更多次数的连续反馈，因此对该结果的解释应谨慎。未来的研究可以将被试的预期水平或任务后唤醒或焦虑水平纳入测量，以便做出更合理的解释。此外，以往的文献指出，SPN 表现出右侧半球优势，且这种优势更多分布在前额区和顶区 (Masaki et al., 2006; Brunia et al., 2011; 李琪 等, 2017; Yi et al., 2018; Chen et al., 2018; Hackley et al., 2020)。本研究中在右额叶区域发现了连续损失对 SPN 波幅的影响，表明 SPN 的额叶偏侧化与主导感的关系在长连续反馈下更为明显。研究显示在高感知控制下，SPN 的振幅会更负 (Mühlberger et al., 2017)，这与本研究的结果一致。SPN 的幅度也可能反映任务参与的水平 (Donkers & van Boxtel., 2005)，因此，连续损失下 SPN 的这种增强也可能反映了个体对任务有更大的参与动机。

4.5 研究不足与展望

尽管获得了许多有意义的发现，但本研究也存在一定的不足和局限，需要在未来的研究中进一步完善。首先，本研究首次引入更长的结果序列，使得整个任务中较长次数反馈的有效分析次数较少，导致脑电分析试次叠加次数不足，未采用同行为数据一样的变量水平进行分析，无法探索随着反馈次数逐步累加 ERP 成分的变化规律。在未来的实验设置中应叠加更多的试次，从而有利于数据分析，或将收益和损失情境分离开来进一步探讨多次反馈对主导感的影响。同时，虽然在整个实验中 3 个 block 的连续伪随机设置不同，但较长的反馈序列也使得无法平衡一次和多次反馈的切换，已有研究表明奖励增加或奖励减少均能促进个体的认知灵活性，而奖励的持续高或低则能增强认知稳定性 (邹倩, 2017; Fröber & Dreisbach, 2021)，因此，我们不能忽略反馈序列中认知灵活性可能带来的调节作用。未来可以设计更精巧的实验平衡一次和多次反馈的切换，排除认知灵活性对主导感的影响，亦或者从认知灵活性角度深入探索主导感的认知神经机制。其二，尽管研究检验了主导感测量随时间进程的稳定性，但在不考虑连续反馈操作时，损失条件下主导感呈现随时间进程发展而减弱的趋势，因此，对于损失条件下的主导感变化的解释需要更加谨慎，未来也应采取更合理更稳定的操

纵方式，以便更好地理解消极情境下的主导感水平变化。由于不同人群对消极反馈的感知存在差异（如情绪障碍患者对消极反馈更为敏感），未来可区分不同人群，进一步厘清损失条件下主导感的变化模式。其三，简单赌博任务仅需要被试进行选择便会给出事先固定的收益或损失的结果，可能混淆被试自身选择对错和反馈效价产生的主导体验。因此，在未来的研究中可以进一步区分能力和效价所导致的个体主导感的不同。最后，不同事件发生的时机和顺序不同，其对个人的影响不同。例如，一个人先被批评两次，后被表扬一次，而另外一个人则是先被表扬一次，再被批评两次。虽然这两个人都被批评两次和表扬一次，但是这两个人对事件结果的主导感有很大概率是不一样的。前者的体验就像是雨过天晴，后者更像是晴天遇霹雳。即结果反馈对主导感的影响可能会因为出现时间的不同占有不同的权重，未来研究还可以探讨正负反馈呈现顺序差异与比例不同时主导感的变化趋势。

综上所述，本研究得出如下的结论：(1)连续反馈对主导感产生了累积的影响，支持了主导感的“动态假说”；(2)收益条件下，主导感遵循二次多项式变化，即主导感随着收益反馈次数先增加，达到主观最高点后逐渐减弱；损失条件下，主导感遵循一元线性变化，即主导感水平随着损失反馈次数的增加，主导感水平逐渐下降；(3)Fb-P3 对连续损失和连续收益表现出差异化敏感；结果反馈加工时的 FRN 波幅与连续收益时对积极结果预期减弱有关，可能影响主导感的变化；结果预期加工时的 SPN 波幅与连续损失对主导感的影响有关。

参考文献

Abele, A. E., Rupprecht, T., & Wojciszke, B. (2008). The influence of success and failure experiences on agency. *European Journal of Social Psychology*, *38*(3), 436–448.

Alsaleh, A., Schubert, M., & Endres, D. (2023, August5–6). The effect of sense of agency on self-efficacy beliefs: A Virtual Reality Paradigm. *In ACM Symposium on Applied Perception 2023 (SAP '23)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 10, 1–11.

An, C. L., Li, L. h., Tian, H. Y., Li, F., Jin, D., Bu, Y. B., & Cao, L.S. (2021). The development of the two-step account of sense of agency. *Journal of Psychological Science*, *44*(5), 1273−1279.

[安灿翎, 李力红, 田昊月, 李飞, 金丹, 布宇博, 曹玲珊. (2021). 施动感双层结构的发展. *心理科学, 44*(5), 1273–1279.]

Bachman, M. D., Watts, A. T. M., Collins, P., & Bernat, E. M. (2022). Sequential gains and losses during gambling feedback: Differential effects in time-frequency delta and theta measures. *Psychophysiology*, *59*(5), e13907.

Bandura, A. (1977). Self-efficacy: toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, *84*(2), 191–215.

Barlas, Z., & Obhi, S. S. (2014). Cultural background influences implicit but not explicit sense of agency for the production of musical tones. *Consciousness and Cognition*, *28*, 94−103.

Barlas, Z., Hockley, W. E., & Obhi, S. S. (2017). The effects of freedom of choice in action selection on perceived mental effort and the sense of agency. *Acta Psychologica*, *180*, 122–129.

Becker, S. W. (1967). Discussion of the effect of frequency of feedback on attitudes and performance. *Journal of*

Accounting Research, *5*, 225–228.

Berkman, E. T., Kahn, L. E., & Livingston, J. L. (2016). Valuation as a mechanism of self-control and ego depletion. In E. R. Hirt, J. J. Clarkson, & L. Jia (Eds.), *In Self-regulation and ego control* (pp. 255−279). Academic Press.

Blakemore, S. J., Wolpert, D. M., & Frith, C. D. (2002). Abnormalities in the awareness of action. *Trends in cognitive sciences*, *6* (6), 237−242.

Böcker, K. B. E., Baas, J. M. P., Kenemans, J. L., & Verbaten, M. N. (2001). Stimulus-preceding negativity induced by fear: a manifestation of affective anticipation. *International Journal of Psychophysiology*, *43*(1), 77−90.

Braun, N., Debener, S., Spychala, N., Bongartz, E., Sörös, P., Müller, H. H. O., & Philipsen, A. (2018). The senses of agency and ownership: A review. *Frontiers in Psychology*, *9*, 535.

Brunia, C. H. M., Hackley, S. A., van Boxtel, G. J. M., Kotani, Y., & Ohgami, Y. (2011). Waiting to perceive: reward or punishment? *Clinical Neurophysiology*, *122*(5), 858–868.

Bryson, L., Warner-Smith, P., Brown, P., & Fray, L. (2007). Managing the work–life roller-coaster: Private stress or public health issue?. *Social Science & Medicine*, *65* (6), 1142−1153.

Burger, J. M., & Arkin, R. M. (1980). Prediction, control, and learned helplessness. *Journal of Personality and Social Psychology*, *38* (3), 482−491.

Cai, S. G.,Zhang, X., & Feng, T. Y., 'Opposition after support' vs. 'Support after opposition': The effect of feedback presentation order in dynamic construction of decision confidence. *Journal of Psychological Science*, *39*(3), 689−692.

[蔡曙光，张笑，冯廷勇. (2016). "先扬后抑" vs. "先抑后扬"：反馈顺序对决策信心建构的影响. *心理科学*. *39*(3),686−692.]

Caspar, E. A., Christensen, J. F., Cleeremans, A., & Haggard, P. (2016). Coercion changes the sense of agency in the human brain. *Current Biology*, *26*(5), 585−592.

Cassotti, M., Houdé, O., & Moutier, S. (2011). Developmental changes of win-stay and loss-shift strategies in decision making. *Child Neuropsychology*, *17*(4), 400−411.

Chen, W., Li, Q., Mei, S., Yi, W., Yang, G., Zhou, S., Liu, X., & Zheng, Y. (2018). Diminished choice effect on anticipating improbable rewards. *Neuropsychologia*, *111*, 45−50.

Coyle, D., Moore, J., Kristensson, P. O., Fletcher, P., & Blackwell, A. (2012). I did that! Measuring users' experience of agency in their own actions. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems* (pp. 2025−2034). Association for Computing Machinery.

Damen, T. G. E. (2019). Sense of agency as a predictor of risk-taking. *Acta Psychologica*, *197*, 10−15.

Di Costa, S., Théro, H., Chambon, V., & Haggard, P. (2018). Try and try again: Post-error boost of an implicit measure of agency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *71*(7), 1584−1595.

Donkers, F. C. L., & van Boxtel, G. J. M. (2005). Mediofrontal negativities to averted gains and losses in the slot-machine task. *Journal of Psychophysiology*, *19*(4), 256−262.

Duncan-Johnson, C. C., & Donchin, E. (1982). The P300 component of the event-related brain potential as an index of information processing. *Biological Psychology*, *14*(1–2), 1−52.

Esser, F., Baader, M. S., Betz, T., & Hungerland, B. (Eds.). (2016). *Reconceptualising agency and childhood: New perspectives in childhood studies*. Routledge.

Fan, J., Gu, R., Lin, Y., & Luo, Y. (2023). Event-related potentials in response to early terminated and completed sequential decision-making. *International Journal of Psychophysiology*, *189*, 11−19.

Foti, D., & Hajcak, G. (2012). Genetic variation in dopamine moderates neural response during reward anticipation and delivery: Evidence from event-related potentials. *Psychophysiology, 49*(5), 617−626.

Frazier, P., Keenan, N., Anders, S., Perera, S., Shallcross, S., & Hintz, S. (2011). Perceived past, present, and future control and adjustment to stressful life events. *Journal of Personality and Social Psychology*, *100*(4), 749−765.

Frith, C. D., Blakemore, S. J., & Wolpert, D. M. (2000). Abnormalities in the awareness and control of action. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, *355* (1404), 1771-1788.

Fuentemilla, L., Cucurell, D., Marco-Pallares, J., Guitart-Masip, M., Moris, J., & Rodriguez-Fornells, A. (2013). Electrophysiological correlates of anticipating improbable but desired events. *Neuroimage*, *78*, 135−144.

Gao, J. (2023). *Abnormal reward processing in adolescent depression is modulated by anxiety: an EEG-based study*(Unpublished master's thesis). Chengdu Medical College.

[高杰. (2023). *青春期抑郁症异常奖赏加工的焦虑影响及其脑电研究*(硕士学位论文), 成都医学院.]

Hackley, S. A., Hirao, T., Onoda, K., Ogawa, K., & Masaki, H. (2020). Anterior insula activity and the effect of agency on the Stimulus-Preceding Negativity. *Psychophysiology*, *57*(4), e13519.

Haggard, P. (2017). Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *18*(4), 196−207.

Hassall, C. D., Yan, Y., & Hunt, L. T. (2023). The neural correlates of continuous feedback processing. *Psychophysiology*, *60*(12), e14399.

Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research*, *77*(1), 81−112.

Herman, A. M., & Tsakiris, M. (2020). Feeling in control: The role of cardiac timing in the sense of agency. *Affective Science*, *1*(3), 155−171.

Huang, X. J., Zhang C., Wan H. F., & Zhang L. C., (2023). Effect of predictability of emotional valence on temporal binding. *Acta Psychologica Sinica*, *55*(1), 36−44.

[黄昕杰, 张弛, 万华根, 张灵聪.(2023). 情绪效价可预测性对时间捆绑效应的影响. *心理学报, 55*(1),36−44.]

Ilgen, D. R., Fisher, C. D., & Taylor, M. S. (1979). Consequences of individual feedback on behavior in organizations. *Journal of applied psychology*, *64* (4), 349−371.

Kaiser, J., Buciuman, M., Gigl, S., Gentsch, A., & Schütz-Bosbach, S. (2021). The interplay between affective processing and sense of agency during action regulation: A Review. *Frontiers in Psychology*, *12*, 716220.

Kiat, J., Straley, E., & Cheadle, J. E. (2016). Escalating risk and the moderating effect of resistance to peer influence on the P200 and feedback-related negativity. *Social cognitive and affective neuroscience*, *11*(3), 377−386.

Killick, R., & Eckley, I. A. (2014). Changepoint: An R package for changepoint analysis. *Journal of Statistical Software*, *58*(3), 1−19.

Kamei, M., Matsumoto, S., & Sakuma, H. (2018). The effect of a pseudo winning or losing streak on mental attitudes and the evaluation of results. *Psychological Reports*, *121*(3), 488−510.

Kühn, S., Nenchev, I., Haggard, P., Brass, M., Gallinat, J., & Voss, M. (2011). Whodunnit? Electrophysiological correlates of agency judgements. *PLoS ONE*, *6*(12), e28657.

Kulakova, E., Khalighinejad, N., & Haggard, P. (2017). I could have done otherwise: Availability of counterfactual comparisons informs the sense of agency. *Consciousness and Cognition*, *49*, 237−244.

Li, D. Y., Li, P., & Li, H. (2018). The updated theories of feedback-related negativity in the last decade. *Advances in Psychological Science*, *26*(9), 1642−1650.

[李丹阳, 李鹏, 李红. (2018). 反馈负波及其近 10 年理论解释. *心理科学进展*, *26*(9), 1642−1650.]

Li, P., Han, C., Lei, Y., Holroyd, C. B., & Li, H. (2011). Responsibility modulates neural mechanisms of outcome processing: An ERP study. *Psychophysiology*, *48*(8), 1129−1133.

Li, P., & Li, H. (2008).Feedback related negativity and its theoretical explains. *Advances in Psychological Science*, *16*(5), 705−711.

[李鹏, 李红. (2008). 反馈负波及其理论解释. *心理科学进展*, *16*(5), 705−711.]

Li, Q., Xu, J., & Zheng, Y. (2017). Stimulus-preceding negativity: An electrophysiological index of reward anticipation. *Advances in Psychological Science*, *25*(7), 1114−1121.

[李琪, 许晶, 郑亚. (2017). 刺激前负波: 奖赏期待的电生理指标. *心理科学进展*, *25*(7), 1114−1121.]

Li, Z., Duan, R., Guo, Y., Li, P., & Warren, C. M. (2023). Distinct influence of inter- versus intra-trial feedback on the brain response to subsequent feedback: Evidence from event-related potentials. *Biological Psychology*, *181*, 108596.

Liden, R. C., Ferris, G. R., & Dienesch, R. M. (1988). The influence of causal feedback on subordinate reactions and behavior. *Group & Organization Studies*, *13*(3), 348−373.

Lin, J. Y., Yang, X. M , Li, H., Lin, W. J., Zhang, J., & Lei, Y. (2024). Enhancing agency in individuals with depressive symptoms: The roles of effort, outcome valence, and its underlying cognitive mechanisms and neural basis. *Depression and Anxiety*, *2024*(1), 3135532.

Lukitsch, O. (2020). Effort, uncertainty, and the sense of agency. *Review of Philosophy and Psychology*, *11*(4), 955−975.

Ma, Q., Zhang, L., & Wang, M. (2018). “You win, You buy”—How continuous win effect influence consumers’ price perception: An ERP study. *Frontiers in Neuroscience*, *12*, 691.

Majchrowicz, B., Kulakova, E., Di Costa, S., & Haggard, P. (2020). Learning from informative losses boosts the sense of agency. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *73*(12), 2272−2289.

Masaki, H., Takeuchi, S., Gehring, W. J., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2006). Affective-motivational influences on feedback-related ERPs in a gambling task. *Brain Research*, *1105*(1), 110−121.

Martin, J., Sugarman, J., & Thompson, J. (2003). *Psychology and the question of agency*. SUNY Press.

Mei, S., Yi, W., Zhou, S., Liu, X., & Zheng, Y. (2018). Contextual valence modulates the effect of choice on incentive processing. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *13*(12), 1249−1258.

Meng, L., & Ma, Q. (2015). Live as we choose: The role of autonomy support in facilitating intrinsic motivation. *International Journal of Psychophysiology*, *98*(3), 441−447.

Mezulis, A. H., Abramson, L. Y., Hyde, J. S., & Hankin, B. L. (2004). Is there a universal positivity bias in attributions? A meta-analytic review of individual, developmental, and cultural differences in the self-serving attributional bias. *Psychological Bulletin*. *130*(5), 711−747.

Ming, X., Lou, Y., Zou, L., Lei, Y., Li, H., & Li, Y. (2021). The cumulative effect of positive and negative feedback on emotional experience. *Psychophysiology*, *58* (12), e13935.

Mühlberger, C., Angus, D. J., Jonas, E., Harmon-Jones, C., & Harmon-Jones, E. (2017). Perceived control increases the reward positivity and stimulus preceding negativity. *Psychophysiology*, *54*(2), 310−322.

Mushtaq, F., Stoet, G., Bland, A. R., & Schaefer, A. (2013). Relative changes from prior reward contingencies can constrain brain correlates of outcome monitoring. *PLoS One*, *8*(6), e66350.

Mushtaq, F., Wilkie, R. M., Mon-Williams, M. A., & Schaefer, A. (2016). Randomised prior feedback modulates neural signals of outcome monitoring. *NeuroImage*, *125*, 868−879.

Nunes, F., Mota, C. P., Ferreira, T., Schoon, I., & Matos, P. M. (2023). Stability and change in adolescents’ sense of agency: Contributions of sex, multiple risk, pandemic stress, and attachment to parents. *Journal of Youth and Adolescence*, *52*(7), 1374−1389.

Ohgami, Y., Kotani, Y., Hiraku, S., Aihara, Y., & Ishii, M. (2004). Effects of reward and stimulus modality on stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology*, *41*(5), 729−738.

Ohgami, Y., Kotani, Y., Tsukamoto, T., Omura, K., Inoue, Y.Aihara, Y., & Nakayama, M. (2006). Effects of monetary reward and punishment on stimulus-preceding negativity. *Psychophysiology*, *43*(3), 227−236.

Oishi, H., Tanaka, K., & Watanabe, K. (2018). Feedback of action outcome retrospectively influences sense of agency in a continuous action task. *PLoS ONE*, *13*(8), e0202690.

Oishi, H., Tanaka, K., & Watanabe, K. (2019). Sense of agency in continuous action is influenced by outcome feedback in one-back trials. *Acta Psychologica*, *199*, 102897.

Osinsky, R., Mussel, P., & Hewig, J. (2012). Feedback-related potentials are sensitive to sequential order of decision outcomes in a gambling task: Feedback-related potentials and sequential outcome order. *Psychophysiology*, *49*(12), 1579−1589.

Peterburs, J., Suchan, B., & Bellebaum, C. (2013). You do the math: coding of bets and outcomes in a gambling task in the feedback-related negativity and P300 in healthy adults. *PLoS ONE*, *8*(11), e81262.

Reis, M., Weller, L., & Muth, F. V. (2022). To follow or not to follow: Influence of valence and consensus on the sense of agency. *Consciousness and Cognition*, *102*, 103347.

Ren, Q., Gentsch, A., Kaiser, J., & Schütz-Bosbach, S. (2023). Ready to go: Higher sense of agency enhances action readiness and reduces response inhibition. *Cognition*, *237*, 105456.

Rusk, R. D. (2022). An adaptive motivation approach to understanding the 'How' and 'Why' of wellbeing. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 19*(19), 12784.

Saarikallio, S. H., Randall, W. M., & Baltazar, M. (2020). Music listening for supporting adolescents' sense of agency in daily life. *Frontiers in Psychology*, *10*, 2911.

Scott, N. J., Ghanem, M., Beck, B., & Martin, A. K. (2022). Depressive traits are associated with a reduced effect of choice on intentional binding. *Consciousness and Cognition*, *105*, 103412.

Sidarus, N., Vuorre, M., & Haggard, P. (2017). How action selection influences the sense of agency: An ERP study. *NeuroImage*, *150*, 1−13.

Shimada, S., Fukuda, K., & Hiraki, K. (2009). Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PLoS ONE*, *4*(7), e6185.

Squires, K. C., Wickens, C., Squires, N. K., & Donchin, E. (1976). The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical eventrelated potential. *Science*, *193*(4258), 1142−1146.

Synofzik, M., Thier, P., Leube, D. T., Schlotterbeck, P., & Lindner, A. (2010). Misattributions of agency in schizophrenia are based on imprecise predictions about the sensory consequences of one's actions. *Brain*, *133*(1), 262−271.

Synofzik, M., Vosgerau, G., & Newen, A. (2008). Beyond the comparator model: a multifactorial two-step account of agency. *Consciousness and cognition*, *17*(1), 219−239.

Takeuchi, S., Mochizuki, Y., Masaki, H., Takasawa, N., & Yamazaki, K. (2005, March). Stimulus preceding negativity represents arousal induced by affective picture. In *International Congress Series* (Vol. 1278, pp. 385-388). Elsevier.

Tian, H. Y., Li, L.H., Xu, Z., Li,F., Jin, D., & An, C. L, (2018). Sense of agency in the minimal self. *Advances in Psychological Science*, *26*(5), 872−885.

[田昊月, 李力红, 徐喆, 李飞, 金丹, 安灿翎. (2018). 最小自我中的施动感. *心理科学进展, 26*(5),872−885.]

Tversky, A., & Kahneman, D. (1991). Loss aversion in riskless choice: A reference-dependent model. *The Quarterly Journal of Economics*, *106*(4), 1039−1061.

Ulrich, N., & Hewig, J. (2018). Electrophysiological correlates of near outcome and outcome sequence processing in problem gamblers and controls. *International Journal of Psychophysiology*, *132*, 379−392.

Villanueva, R. A. M., & Chen, Z. J. (2019). ggplot2: Elegant graphics for data analysis (2nd ed.). *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, *17*(3), 160–167.

Walsh, M. M., & Anderson, J. R. (2012). Learning from experience: Event-related potential correlates of reward processing, neural adaptation, and behavioral choice. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *36*(8), 1870−1884.

Wu, D., Gu, J. J., Li, M., Zhang, M., Zhang, M., Zhao, K., & Fu, X. L (2019). Sense of agency based on action and

causation: The mechanism of intentional binding effect for voluntary action. *Advances in Psychological Science*, *27*(5), 804−810.

[吴迪, 顾晶金, 李明, 张淼, 张明, 赵科, 傅小兰. (2019). 动作的主动控制感与因果关系的主动控制感:主动动作时间压缩效应的产生机制. *心理科学进展, 27*(5), 804−810.]

Xue, G., He, Q., Lei, X., Chen, C., Liu, Y., Chen, C., Lu, Z.-L., Dong, Q., & Bechara, A. (2012). The gambler's fallacy is associated with weak affective decision making but strong cognitive ability. *PLoS ONE*, *7*(10), e47019.

Xue, G., He, Q., Lu, Z.-L., Levin, I. P., Dong, Q., & Bechara, A. (2013). Agency modulates the lateral and medial prefrontal cortex responses in belief-based decision making. *PLoS ONE*, *8*(6), e65274.

Yoshie, M., & Haggard, P. (2013). Negative emotional outcomes attenuate sense of agency over voluntary actions. *Current Biology*, *23*(20), 2028−2032.

Yang, Z. H., Cheng, W. H., & Zhang, J. J. (2011). *Goodness-of-fit test*(pp.23-45). Beijing: Science Press.

[杨振海, 程维虎, 张军舰. (2011). *拟合优度检验*(pp.23−45). 北京: 科学出版社.]

Yeung, N., Holroyd, C. B., & Cohen, J. D. (2005). ERP correlates of feedback and reward processing in the presence and absence of response choice. *Cerebral Cortex*, *15*(5), 535−544.

Yi, W., Mei, S., Li, Q., Liu, X., & Zheng, Y. (2018). How choice influences risk processing: An ERP study. *Biological Psychology*, *138*, 223−230.

Zhang, J., & Li, H. W. (2016). The plasticity of self-representation: based on the studies of rubber hand illusion. *Journal of Psychological Science*, *39*(02), 299-304.

[张静, 李恒威. (2016). 自我表征的可塑性:基于橡胶手错觉的研究. *心理科学*, *39*(02), 299−304.]

Zhang, M., Wu, D., Li, M., Ling, Y, B.,Zhang, M., & Zhao, K. (2018).The measurement and neural mechanism of sense of agency. *Advances in Psychological Science*, *26*(10), 1787−1793.

[张淼, 吴迪, 李明, 凌懿白, 张明, 赵科. (2018). 主动控制感的测量及认知神经机制. *心理科学进展*, *26*(10), 1787−1793.]

Zhang, Q. W. (2018). *The influence of implementation intentions and the frustration situation to the feeling of agency*(Unpublished master's thesis). Sichuan Normal University, Chengdu, China.

[张权伟. (2018). *实施意图和不同挫折情境对于能动感的影响研究*(硕士学位论文). 四川师范大学. 成都]

Zhao, K., Gu, J. J., Huang, G. H., Zheng, S., & Fu, X. L. (2021). The spatiotemporal markers for the sense of agency in the human brain. *Advances in Psychological Science*, *29*(11), 1901−1910.

[赵科, 顾晶金, 黄冠华, 郑爽, 傅小兰. (2021). 主动控制感在大脑表征中的时空标记. *心理科学进展*, *29*(11), 1901−1910.]

Zheng, Y., Li, Q., Wang, K., Wu, H., & Liu, X. (2015). Contextual valence modulates the neural dynamics of risk processing: Neural dynamics of risk processing. *Psychophysiology*, *52*(7), 895−904.

Zhong, Y. P., Niu N. N., Fan, W., Ren, M. M., & Li, M. (2023). The influence of voluntary action and social distance on sense of agency: Evidence from behavioral and ERPs study. *Acta Psychologica Sinica*, *55*(12), 1932−1948.

[钟毅平, 牛娜娜, 范伟, 任梦梦, 李梅. (2023). 动作自主性与社会距离对主动控制感的影响：来自行为与ERPs的证据. *心理学报*, *55*(12), 1932−1948.]

Sequential Feedback Influences the Psychological and Event-related Potentials Mechanism of Sense of Agency

XIE XiaoLing[1], PAN WenYi[1], ZHANG ChunChun[1], Lin JingYuan[1], LI Hong[1,2]

([1]Institute of Brain and Psychological Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China)

([2]School of Psychology, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract

This study aimed to investigate the impact of multiple sequential feedback on sense of agency (SoA) and its underlying cognitive mechanisms, bridging a gap in previous research that primarily focused on the influence of outcome feedback valences on SoA. Employing a simple gambling task (door task), the study manipulated the number of successive feedbacks and utilized explicit measure of SoA.

A within-subject design of 2 (outcome valence: gain, loss) × 8 (sequential feedback times: 1~8) was implemented. The study included forty college students (38 in the final analysis, with 20 females, aged 20.79±1.70), who voluntarily participated. During the experiment, participants guessed which of two doors contained a reward and selected the corresponding door by pressing a button. Feedback resulted in a gain of 10 for a correct guess and a loss of 10 for an incorrect one, with outcome feedback predetermined before the experiment, leading to one to eight different gain or loss sequences. Subsequently, participants rated their SoA after receiving feedback. Event-related potential responses to outcome feedback, focusing on stimulus-preceding negativity (SPN) in the outcome anticipation phase, and feedback-related negativity (FRN) and feedback-P3 (fb-P3) in the outcome processing phase, were recorded and analyzed.

Behavioral results revealed a significantly lower SoA under loss conditions compared to gain conditions, aligning with previous findings. Sequential feedback demonstrated a cumulative effect on SoA, with continuous changes observed based on feedback results. Under gain conditions, the cumulative effect followed a quadratic polynomial model, with SoA increasing to a "change" point (the seventh gain feedback) and then stabilizing. Conversely, under loss conditions, SoA gradually diminished with continuous loss feedback, following a unitary linear model. Combining ERP and behavioral results, it was found that SoA under continuous loss was related to the amplitude of right frontal lobe SPN before outcome feedback. FRN amplitude was sensitive to the continuity of loss, being more negative under continuous loss compared to discontinuous loss and associated with a higher repetition rate of subsequent behavior selection. Moreover, continuous losses induced a significantly greater Fb-P3 amplitude compared to continuous gains.

In conclusion, this study provides empirical evidence supporting the dynamic account of SoA, revealing differentiated developmental mechanisms in both behavior and ERPs under sequential

gain and loss conditions. These findings shed light on how sequential feedback influences SoA and the characteristics of processing time.

Keywords sense of agency, sequential feedback, event-related potentials (ERPs), stimulus-preceding negativity (SPN), feedback-related negativity (FRN), feedback-P3 (Fb-P3)

附表 1 收益条件下，主导感自评得分的成对比较

连续反馈次数	1	2	3	4	5	6	7
2	-0.67 (0.11) $p<0.001$						
3	-1.15 (0.17) $p<0.001$	-0.48 (0.08) $p<0.001$					
4	-1.57 (0.24) $p<0.001$	-0.90 (0.15) $p<0.001$	-0.42 (0.10) $p=0.005$				
5	-1.87 (0.28) $p<0.001$	-1.20 (0.21) $p<0.001$	-0.722 (0.15) $p<0.001$	-0.30 (0.07) $p=0.002$			
6	-2.13 (0.30) $p<0.001$	-1.46 (0.23) $p<0.001$	-0.99 (0.18) $p<0.001$	-0.56 (0.11) $p<0.001$	-0.26 (0.06) $p=0.003$		
7	-2.04 (0.31) $p<0.001$	-1.37 (0.24) $p<0.001$	-0.90 (0.18) $p<0.001$	-0.47 (0.13) $p=0.016$	-0.17 (0.09) $p=1.000$	0.09 (0.06) p=1.000	
8	-2.13 (0.32) $p<0.001$	-1.46 (0.26) $p<0.001$	-0.98 (0.20) $p<0.001$	-0.56 (0.14) $p=0.010$	-0.26 (0.10) $p=0.499$	0.00 (0.06) $p=1.000$	-0.09 (0.06) $p=1.000$

注：分别为两组的均值差值（标准误）和差异的显著性。

附表 2 损失条件下，主导感自评得分的成对比较

连续反馈次数	1	2	3	4	5	6	7
2	0.06 (0.09) *p*=1.000						
3	0.19 (0.12) *p*=1.000	0.14 (0.07) *p*=1.000					
4	0.29 (0.15) *p*=1.000	0.23 (0.09) *p*=0.376	0.10 (0.08) *p*=1.000				
5	0.24 (0.15) *p*=1.000	0.18 (0.10) *p*=1.000	0.05 (0.08) *p*=1.000	-0.05 (0.08) *p*=1.000			
6	0.45 (0.14) *p*=0.061	0.40 (0.09) *p*=0.003	0.26 (0.09) *p*=0.172	0.17 (0.07) *p*=0.758	0.21 (0.10) *p*=1.000		
7	0.49 (0.16) *p*=0.100	0.43 (0.11) *p*=0.008	0.30 (0.08) *p*=0.027	0.20 (0.08) *p*=0.278	0.25 (0.07) *p*=0.036	0.04 (0.07) *p*=1.000	
8	0.54 (0.18) *p*=0.154	0.49 (0.14) *p*=0.030	0.35 (0.12) *p*=0.157	0.26 (0.10) *p*=0.385	0.30 (0.10) *p*=0.162	0.09 (0.10) *p*=1.000	0.05 (0.07) *p*=1.000

注：分别为两组的均值差值（标准误）和差异的显著性。

附表 3 收益下，主导感自评得分与“5”的单样本 t 检验结果

连续反馈次数	*N*	*M*	*SD*	*t*	*p*	Cohen's *d*
1	38	4.35	1.97	-2.03	0.049	1.97
2	38	5.02	1.95	0.06	0.951	1.95
3	38	5.50	1.98	1.55	0.131	1.98
4	38	5.92	2.01	2.83	0.008	2.01
5	38	6.22	2.08	3.61***	<0.001	2.08
6	38	6.48	2.04	4.47***	<0.001	2.04
7	38	6.39	2.11	4.07***	<0.001	2.11
8	38	6.48	2.10	4.34***	<0.001	2.10

附表 4 损失下，主导感自评得分与“5”的单样本 t 检验结果

连续反馈次数	*N*	*M*	*SD*	*t*	*p*	Cohen's *d*
1	38	3.19	1.41	-7.93***	<0.001	1.41
2	38	3.13	1.37	-8.39***	<0.001	1.37
3	38	3.00	1.43	-8.63***	<0.001	1.43
4	38	2.90	1.45	-8.95***	<0.001	1.45
5	38	2.95	1.47	-8.59***	<0.001	1.47
6	38	2.74	1.42	-9.85***	<0.001	1.42
7	38	2.70	1.47	-9.67***	<0.001	1.47
8	38	2.65	1.55	-9.39***	<0.001	1.55